

**J. NIARD**

**COURS**

**D'ÉLECTRICITÉ**

**PREMIER FASCICULE**

**1<sup>er</sup> F.**

**TOUTES  
OPTIONS**

**Baccalauréat de Technicien**

**LOIS  
GÉNÉRALES.  
COURANT  
CONTINU.**

**MASSON ET CIE**





J. NIARD

Ancien élève de l'E.N.S.E.T.

Professeur au lycée Technique de Champagne-sur-Seine

# ÉLECTRICITÉ

**Lois générales — Courant continu**

CLASSES DE

**PREMIÈRES**

**F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>**

*Préparation au Baccalauréat de Techniciens*

*« Construction mécanique » (1<sup>re</sup> F<sub>1</sub>); « Électronique » (1<sup>re</sup> F<sub>2</sub>)*

*« Électrotechnique » (1<sup>re</sup> F<sub>3</sub>)*

MASSON ET C<sup>ie</sup>

120, boulevard Saint-Germain — PARIS (VI<sup>e</sup>)

**J. NIARD**

Ancien élève de l'E.N.S.E.T.

Professeur au lycée Technique de Champagne-sur-Seine

## **Cours d'Électricité**

Classes de 1<sup>re</sup> F<sub>1</sub>, 1<sup>re</sup> F<sub>2</sub>, 1<sup>re</sup> F<sub>3</sub> :

### **Lois générales — Courant continu**

Un volume 376 pages, avec figures et exercices; cartonné.

### **Lois générales — Courant alternatif**

Un volume 152 pages, avec figures et exercices; cartonné.

Classes de 1<sup>re</sup> F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> :

### **Électronique**

Un volume 240 pages, avec figures et exercices; cartonné.

Classes Terminales :

### **Machines Électriques**

cl. de F<sub>1</sub>, F<sub>3</sub>

Un volume 338 pages, avec figures et exercices; cartonné.

### **Électronique**

cl. de F<sub>1</sub>

Un volume avec figures et exercices; cartonné.

Techniciens (1<sup>re</sup> F<sub>2</sub> et 1<sup>re</sup> F<sub>3</sub>) - Techniciens supérieurs - C.N.A.M.

### **Compléments d'Électricité**

#### **Compléments d'électrocinétique**

#### **L'alternatif par les nombres complexes**

Un volume 170 pages, avec figures et exercices; cartonné.

# AVERTISSEMENT

Cet ouvrage est destiné aux classes de 1<sup>re</sup> F qui préparent aux différents baccalauréats de Technicien: « Construction mécanique », « Électronique », « Électrotechnique ». Pour l'option « construction mécanique », les quelques paragraphes précédés d'un astérisque pourront ne pas être étudiés.

En laissant de côté les chapitres ou paragraphes qui ne sont pas à leur programme, on pourra également utiliser ce livre pour les autres options du groupe F: « Génie civil », « Physique », « Chimie » et « Biochimie ».

Ce cours d'électricité a été conçu pour faciliter la tâche du professeur et de ses élèves. Les leçons y sont généralement courtes, structurées, avec les résultats essentiels mis en évidence et les formules principales en gros caractères.

Le cours dicté et le cahier correspondant pourront alors être réduits à peu de choses, voire supprimés. D'une part, l'élève suivra ainsi l'exposé du Professeur avec plus d'attention et d'autre part, le temps économisé sera avantageusement utilisé à des applications numériques.

A la fin de chaque chapitre on trouvera de nombreux exercices et problèmes dont certains avec solution complète, ou avec réponses, permettront d'assimiler le cours et de contrôler les connaissances.

Nous espérons que ce livre continuera à rendre service à ceux qui l'utiliseront, tant dans les classes des Lycées techniques que dans les cours du soir. Nous pensons également qu'il pourra être utilisé avec profit par les autodidactes et les auditeurs — ou futurs auditeurs — des cours d'électricité industrielle du Conservatoire National des Arts et Métiers.

Qu'ils nous soit permis, au terme de cet avertissement, de remercier tous ceux qui nous ont apporté leur aide, soit en nous procurant leur précieuse documentation, soit en relisant nos épreuves.

J. NIARD.

# SYMBOLES GRAPHIQUES

Courant continu.



Courant alternatif.



Conducteurs se croisant sans connexion.



Croisement de conducteurs connectés.



Ligne trifilaire (représentation simplifiée).



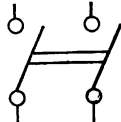
Borne ou contact (2 variantes).



Interrupteur monopolaire.



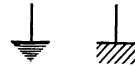
Interrupteur bipolaire.



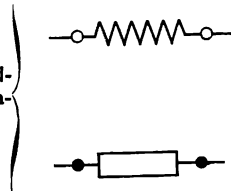
Prise de courant bipolaire.



Mise à la terre ou à la masse.



Résistance quelconque (2 variantes).



Résistance non inductive.



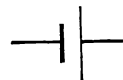
Rhéostat.



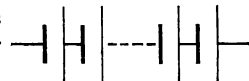
Lampe.



Générateur chimique (1 élément). Le trait long et fin est le pôle +.



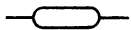
Batterie de piles ou d'accumulateurs.



Voltamètre, cuve  
d'électrolyse.



Fusible.



Générateur tournant  
(continu).



Moteur (continu).



Ampèremètre.



Shunt d'ampère-  
mètre.



Voltmètre.



Wattmètre.



Ohmmètre.



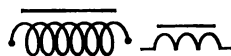
Compteur d'énergie.



Symboles d'une  
inductance sans  
fer.



Symboles d'une  
inductance avec  
fer.



Condensateur.



# TABLE DES MATIÈRES

---

|                                                            | Pages |
|------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Introduction</b> . . . . .                              | 1     |
| 1 <b>L'énergie.</b> . . . . .                              | 6     |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 16    |
| 2 <b>Puissance</b> . . . . .                               | 19    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 22    |
| 3 <b>Le courant électrique</b> . . . . .                   | 25    |
| 4 <b>Intensité d'un courant.</b> . . . . .                 | 33    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 38    |
| 5 <b>Nature d'un courant électrique</b> . . . . .          | 40    |
| <i>Exercices ..</i> . . . . .                              | 43    |
| 6 <b>Différence de potentiel</b> . . . . .                 | 45    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 52    |
| 7 <b>Énergie et puissance électriques</b> . . . . .        | 55    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 61    |
| 8 <b>Loi de Joule</b> . . . . .                            | 64    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 69    |
| 9 <b>Loi d'Ohm</b> . . . . .                               | 72    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 77    |
| 10 <b>Résistivité</b> . . . . .                            | 81    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 87    |
| 11 <b>Conséquences de l'effet Joule</b> . . . . .          | 90    |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 95    |
| 12 <b>Groupement de résistances en série</b> . . . . .     | 100   |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 106   |
| 13 <b>Groupement de résistances en parallèle</b> . . . . . | 110   |
| <i>Problèmes.</i> . . . . .                                | 115   |

|    |                                                                  |     |
|----|------------------------------------------------------------------|-----|
| 14 | <b>Générateurs</b> . . . . .                                     | 119 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 125 |
| 15 | <b>Association de générateurs</b> . . . . .                      | 129 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 133 |
| 16 | <b>Récepteurs</b> . . . . .                                      | 138 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 144 |
| 17 | <b>Loi d'ohm pour un circuit fermé</b> . . . . .                 | 148 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 152 |
| 18 | <b>Électrolyse. Lois qualitatives</b> . . . . .                  | 157 |
| 19 | <b>Électrolyse. Étude quantitative et applications</b> . . . . . | 165 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 171 |
| 20 | <b>Piles hydroélectriques</b> . . . . .                          | 174 |
| 21 | <b>Piles usuelles</b> . . . . .                                  | 181 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 185 |
| 22 | <b>Polarisation d'un voltamètre.</b> . . . .                     | 187 |
| 23 | <b>Accumulateur au plomb (acide).</b> . . . .                    | 191 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 198 |
| 24 | <b>Accumulateur au cadmium-nickel (alcalin).</b> . . . .         | 203 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 209 |
| 25 | <b>Le champ magnétique</b> . . . . .                             | 211 |
| 26 | <b>Forces électromagnétiques</b> . . . . .                       | 225 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 232 |
| 27 | <b>Flux d'induction magnétique.</b> . . . .                      | 234 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 239 |
| 28 | <b>Inductions dues aux courants</b> . . . . .                    | 243 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 251 |
| 29 | <b>Travail des forces électromagnétiques</b> . . . . .           | 254 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 260 |
| 30 | <b>Phénomènes d'aimantation.</b> . . . .                         | 263 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 273 |
| 31 | <b>Induction électromagnétique</b> . . . . .                     | 274 |
|    | <i>Problèmes.</i> . . . .                                        | 283 |

|    |                                                                  |     |
|----|------------------------------------------------------------------|-----|
| 32 | <b>Induction propre et induction mutuelle</b> . . . . .          | 285 |
|    | <i>Problèmes</i> . . . . .                                       | 293 |
| 33 | <b>Appareils magnéto-électriques</b> . . . . .                   | 296 |
| 34 | <b>Appareils ferromagnétiques et électrodynamiques</b> . . . . . | 305 |
| 35 | <b>Notions d'électrostatique</b> . . . . .                       | 310 |
|    | <i>Exercices</i> . . . . .                                       | 323 |
|    | <i>Problèmes</i> . . . . .                                       | 325 |
| 36 | <b>Condensateurs</b> . . . . .                                   | 328 |
|    | <i>Problèmes</i> . . . . .                                       | 333 |
| 37 | <b>Charge et décharge d'un condensateur</b> . . . . .            | 336 |
| 38 | <b>Le courant électrique et le corps humain</b> . . . . .        | 343 |
| 39 | <b>Forces électromotrices de contact</b> . . . . .               | 346 |
|    | <i>Exercices</i> . . . . .                                       | 352 |
|    | APPENDICE I . . . . .                                            | 353 |
|    | APPENDICE II . . . . .                                           | 355 |
|    | PROBLÈMES DE RÉVISION . . . . .                                  | 357 |

---

*Tous droits de reproduction,  
de traduction et d'adaptation  
— réservés pour tous pays —*

---

© 1969, Masson et C<sup>ie</sup>, Éditeurs  
Imprimé en France

---



# INTRODUCTION

---

## I. Écriture des nombres.

1° Dans un nombre entier ou décimal, les groupes de trois chiffres d'une même classe doivent être séparés par un espace blanc et non par un point :

*Il faut écrire*      4 785 et non 4785 ou 4.785  
                         0,234 71 et non 0,23471 ou 0,234.71

2° Tous les chiffres, quel que soit leur rang, doivent être écrits de la même façon :

*Il faut écrire*      7,32 et non 7,32 ou 7,<sup>32</sup>.

3° Les résultats doivent être exprimés par un nombre décimal et non par une fraction :

*Il faut écrire* 0,75 et non  $\frac{3}{4}$ .

REMARQUE. — Si dans le cours d'un problème, on trouve une réponse égale à une fraction non décimale, la réponse doit être exprimée avec un nombre décimal mais la fraction peut être reprise pour les calculs suivants dans l'espoir d'une simplification toujours possible.

EXEMPLE. — Si on trouve  $\frac{7}{3}$  on écrit la réponse : 2,33 mais on peut réutiliser  $\frac{7}{3}$  pour les calculs ultérieurs.

4° Le résultat numérique concret s'écrit en faisant suivre le nombre de l'unité correspondante et non en écrivant celle-ci au milieu du nombre quand il comporte une virgule. Cette unité doit être placée sur la même ligne que les chiffres et avec un caractère de même corps.

*Il faut écrire* 9,45 m et non 9 m,45 ou 9, <sup>m</sup> 45.

5° **Expression d'un résultat en électricité.** — Il est rare qu'une mesure électrique soit effectuée avec une précision supérieure à 1 %, il est donc inutile (et dangereux car on allonge les calculs et on augmente

les risques d'erreurs) de donner plus de trois chiffres significatifs à un résultat :

EXEMPLES. — Si l'on trouve 4 752,4 on écrira **4750**;  
3,546 on écrira **3,55** le dernier chiffre conservé étant majoré d'une unité si le premier chiffre abandonné est 5, 6, 7, 8 ou 9.

Nous avons respecté cette règle dans les résultats numériques sauf lorsque le quatrième chiffre étant un 5 et que les calculs ultérieurs en étaient simplifiés.

6° Pour éviter de traîner des zéros dans les calculs il est bon d'écrire les nombres plus grands que 1 000 et les nombres plus petits que 1 en utilisant les puissances de 10.

EXEMPLES :  $375\,000 = 375 \cdot 10^3$   
 $0,002\,51 = 251 \cdot 10^{-5}$

## II. Symboles littéraux.

1° **Grandeurs.** — Chaque grandeur est représentée par une lettre, appelée symbole de la grandeur. On trouvera ces symboles dans le tableau des unités S.I (§ III).

2° **Unités.** — a) *Noms des unités.* — Ils s'écrivent toujours avec une minuscule comme première lettre et s'accordent comme un nom commun même s'ils proviennent d'un nom propre.

EXEMPLES :  
1 mètre                      2 mètres  
1 ampère                    2 ampères

b) *Symboles.* — Les symboles s'écrivent avec une lettre (parfois deux). Si l'unité vient d'un nom commun la lettre est minuscule; si l'unité vient d'un nom propre la lettre est majuscule.

Les symboles ne prennent *jamais d's* au pluriel.

EXEMPLES :  
2 mètres                    → 2 m (et non 2 ms)  
3 ampères                  → 3 A (et non 3 As)  
4 kilogrammes            → 4 kg (et non 4 kgs)

REMARQUE. — Si l'unité n'a pas reçu de nom particulier elle rappelle l'opération (multiplication ou division) qui permet de calculer la grandeur correspondante.

## EXEMPLES :

Vitesse : mètre par seconde (division)  $\rightarrow$  m/sMoment : mètre-newton (multiplication)  $\rightarrow$  m.N

**3<sup>o</sup> Multiples et sous-multiples.** — Ils permettent d'écrire de très grands nombres ou de très petits en évitant d'avoir beaucoup de zéros ou un facteur  $10^n$ .

Pratiquement, en électricité, on utilise seulement les préfixes qui correspondent à une puissance de 10 multiple de 3.

Bien noter que la nouvelle unité obtenue s'écrit sans trait d'union. Il faut écrire :

millimètre et non milli-mètre

kilovolt et non kilo-volt

Les symboles correspondants s'écrivent sans point. Il faut écrire :

mm et non m.m (encore moins m/m)

kV et non k.V

**REMARQUE.** — Si le symbole d'un multiple ou d'un sous-multiple comporte un exposant, celui-ci se rapporte à l'ensemble du symbole et non à l'unité seulement :

**EXEMPLE :**  $1 \text{ cm}^2$  signifie  $(1 \text{ cm})^2 = (10^{-2} \text{ m})^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$  et non un centième de mètre carré ( $0,01 \text{ m}^2$ ).

TABLEAU

| MULTIPLES |         |                             | SOUS-MULTIPLES |         |                                    |
|-----------|---------|-----------------------------|----------------|---------|------------------------------------|
| Préfixe   | Symbole | Rapport à l'unité           | Préfixe        | Symbole | Rapport à l'unité                  |
| déca      | da      | $10 = 10$                   | déci           | d       | $0,1 = 10^{-1}$                    |
| hecto     | h       | $100 = 10^2$                | centi          | c       | $0,01 = 10^{-2}$                   |
| kilo      | k       | $1\ 000 = 10^3$             | milli          | m       | $0,001 = 10^{-3}$                  |
| méga      | M       | $1 \text{ million} = 10^6$  | micro          | $\mu$   | $1 \text{ millionième} = 10^{-6}$  |
| giga      | G       | $1 \text{ milliard} = 10^9$ | nano           | n       | $1 \text{ milliardième} = 10^{-9}$ |
| tera      | T       | $10^{12}$                   | pico           | p       | $= 10^{-12}$                       |

### III. Système international d'unités (Système S.I).

1° Il est légal en France depuis le 3 mai 1961.

2° Il remplace intégralement l'ancien système légal MTS et les systèmes CGS et MKpS.

3° Certaines unités anciennes restent tolérées ou deviennent des multiples ou sous-multiples des nouvelles.

EXEMPLES : 1 calorie = 4,18 J <sup>(1)</sup> (tolérée)

1 dyne = 10<sup>-5</sup> N (sous-multiple).

4° D'autres unités doivent être abandonnées : c'est le cas du cheval-vapeur. Comme il s'écoulera encore des années avant son abandon effectif nous l'avons inclus dans quelques problèmes.

5° Nous donnons ci-contre, un tableau des grandeurs et unités S.I. utilisées dans ce livre. Les relations entre unités S.I et anciennes unités sont précisées dans les leçons correspondantes si cela est utile.

#### SYSTÈME S.I. (M. K. S. A. GIORGI)

| GRANDEURS (2)             | SYMBOLES<br>DES<br>GRANDEURS | UNITÉS                       | SYMBOLES<br>DES<br>UNITÉS |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| LONGUEUR                  | <i>l</i>                     | mètre                        | m                         |
| Aire, Surface . . . . .   | <i>S</i>                     | mètre carré                  | m <sup>2</sup>            |
| Volume . . . . .          | <i>V</i>                     | mètre cube                   | m <sup>3</sup>            |
| Angle plan . . . . .      | $\alpha, \beta, \dots$       | radian                       | rd                        |
| MASSE . . . . .           | <i>m</i>                     | kilogramme                   | kg                        |
| Masse volumique . . . . . | $\mu$                        | kilogramme<br>par mètre cube | kg/m <sup>3</sup>         |
| TEMPS, Durée . . . . .    | <i>t</i>                     | seconde                      | s                         |
| Fréquence . . . . .       | <i>f</i>                     | hertz                        | Hz                        |

(1) La valeur admise est 4,185 5, il faudrait donc écrire 1 calorie = 4,19 J, le nombre 4,18 est tellement entré dans les habitudes que nous n'avons pas cru devoir le modifier.

(2) Les grandeurs fondamentales sont en majuscules.

**SYSTÈME S.I. (suite)**

| GRANDEURS (1)                | SYMBOLES<br>DES<br>GRANDEURS | UNITÉS                            | SYMBOLES<br>DES<br>UNITÉS |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| Vitesse angulaire . . . . .  | $\omega$                     | radian par seconde                | rd /s                     |
| Accélération angulaire . .   | $\omega'$                    | radian par seconde<br>par seconde | rd /s <sup>2</sup>        |
| Vitesse . . . . .            | v                            | mètre par seconde                 | m /s                      |
| Accélération . . . . .       | $\gamma$                     | mètre par seconde<br>par seconde  | m /s <sup>2</sup>         |
| Force . . . . .              | F                            | newton                            | N                         |
| Moment d'un couple . . .     | M, $\Gamma$ , C              | mètre-newton                      | m.N                       |
| Constante de torsion . .     | C                            | mètre-newton<br>par radian        | m.N/rd                    |
| Moment d'inertie . . . . .   | I, J                         | kilogramme-mètre<br>carré         | kgm <sup>2</sup>          |
| Énergie ou travail . . . .   | W                            | joule                             | J                         |
| Puissance . . . . .          | P                            | watt                              | W                         |
| Pression . . . . .           | p                            | pascal                            | Pa                        |
| Quantité de chaleur . . .    | Q, W                         | joule                             | J                         |
| Chaleur massique . . . .     | c                            | joule par degré<br>kilogramme     | J /°C.kg                  |
| <b>INTENSITÉ</b> . . . . .   | I                            | ampère                            | A                         |
| Quantité d'électricité . .   | Q                            | coulomb                           | C                         |
| Force électromotrice . .     | E                            | volt                              | V                         |
| Différence de potentiel . .  | U                            |                                   |                           |
| (ou tension) . . . . .       |                              |                                   |                           |
| Champ électrique . . . .     | E                            | volt par mètre                    | V/m                       |
| Résistance . . . . .         | R                            | ohm                               | $\Omega$                  |
| Résistivité . . . . .        | $\rho$                       | ohm-mètre                         | $\Omega$ m                |
| Induction . . . . .          | B                            | tesla                             | T                         |
| Flux . . . . .               | $\Phi$                       | weber                             | Wb                        |
| Champ magnétique . . . .     | H                            | ampère par mètre                  | A/m                       |
| Intensité d'alimentation .   | J                            | ampère par mètre                  | A/m                       |
| Force magnétomotrice . .     | F                            | ampère (-tour)                    | A ou A.T.                 |
| Moment magnétique . . .      | M, $\mathcal{M}$             | ampère-<br>mètre carré            | Am <sup>2</sup>           |
| Inductance . . . . .         | L, M                         | henry                             | H                         |
| Capacité . . . . .           | C                            | farad                             | F                         |
| <b>TEMPÉRATURE</b> . . . . . | $\theta$ , T                 | degré Celsius<br>ou degré Kelvin  | °C<br>°K                  |

(1) Les grandeurs fondamentales sont en majuscules.

# L'ÉNERGIE

## 1. Définition.

Nous pouvons lire sur un dictionnaire :

« Un corps possède de l'énergie lorsqu'il peut fournir du travail. »

Nous allons, au cours de ce chapitre, essayer de préciser la notion d'énergie.

## 2. Importance de l'énergie.

Depuis toujours, pour économiser ses forces et améliorer ses conditions de vie, l'homme a recherché les sources d'énergie et inventé les machines qui permettent la transformation, en une forme convenable, de cette énergie.

L'énergie est utilisée, en permanence, dans tous les domaines, sous toutes ses formes.

Nous citerons quelques exemples simples qui nous permettront, en même temps, de nous familiariser avec les différentes formes de l'énergie.

— L'énergie *chimique* en réserve dans le charbon est transformée en énergie *thermique* par la combustion.

— L'énergie *électrique* est transformée en énergie *lumineuse* par les lampes électriques.

— L'énergie *mécanique* est utilisée pour produire un mouvement et, par suite, du travail : machines-outils, véhicules.

— L'énergie *nucléaire* (atomique) aujourd'hui « domestiquée » produit de l'énergie électrique.

## 3. Sources d'énergie.

1° **Le soleil.** — Le soleil est une source pratiquement inépuisable. Il nous envoie de l'énergie sous forme de radiations, ces radiations chauffent (et éclairent) les corps qui les reçoivent.

Il en résulte une quantité de phénomènes parmi lesquels nous citerons :

- réactions chimiques dans les plantes;
- évaporation (mise en mouvement de l'eau);
- vents (mise en mouvement de l'air).

Ces phénomènes nous permettent une utilisation indirecte de l'énergie solaire.

L'utilisation directe est réalisée grâce aux fours solaires.

En outre, lorsqu'il est suffisant, le rayonnement solaire nous dispense d'utiliser un moyen de chauffage artificiel.

Le soleil est donc une source d'énergie considérable et ...gratuite.

**2° L'énergie en réserve.** — On la trouve sous des aspects très variés.

a) *Réserves géologiques* : Le bois, le charbon, le pétrole, le gaz naturel. Ces réserves s'épuisent peu à peu et disparaîtront totalement un jour. Seul le bois se renouvelle lentement mais il ne représente qu'une faible part de la consommation.

b) *Matériaux nucléaires* : Ils appartiennent aux réserves géologiques mais leur exploitation est récente. Ils arrivent à point pour prendre la relève des combustibles que nous venons de citer.

c) *Réserves potentielles* : Masse d'eau accumulée derrière un barrage ou dans un lac de montagne. Ces réserves se renouvellent naturellement par l'évaporation et les pluies (grâce au soleil).

**3°** Le vent, l'eau en mouvement (rivières, marées) sont aussi des sources d'énergie mais elles nécessitent une *utilisation immédiate*. Il en est de même de l'énergie électrique.

#### **4. L'énergie en action.**

- Le charbon qui brûle donne de la chaleur (énergie thermique).
- Le mélange air-essence qui explose produit la marche d'un véhicule (énergie mécanique).
- La chute d'eau qui fait tourner le groupe turbine-alternateur produit de l'énergie électrique.

On voit que l'énergie qui était en réserve dans une source peut être mise en action pour produire selon nos désirs : de la chaleur, un mouvement, de l'électricité...

## 5. Mesure de l'énergie.

1° Nous pouvons mesurer une quantité d'énergie quelconque par la quantité de chaleur que l'on obtiendrait en la transformant intégralement en énergie thermique.

Cette quantité de chaleur sera exprimée en **calories (cal)** <sup>(1)</sup>.

2° **Définition simplifiée de la calorie.** — La calorie est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 g d'eau pour élever sa température de 1 °C.

3° **Remarque.** — Quand il n'y aura pas ambiguïté, nous désignerons une quantité d'énergie par le seul mot **énergie** dont le symbole est **W** (comme pour le travail).

## 6. Unités d'énergie.

1° La calorie est une unité « *hors système* » et doit être abandonnée au profit de l'**unité légale**. Cependant, elle est encore très utilisée pour les quantités de chaleur, il faut donc la connaître.

2° **Unité légale.** — C'est le **joule (J)**. Sa définition est donnée dans le cours de mécanique et dans l'appendice 1.

Il faut retenir que :

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J} \text{ }^{(2)}$$

3° **Unités pratiques.** — Le **watt-heure (Wh)** et ses multiples (voir § 13) :

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$$

## 7. Transformation de l'énergie.

1° **Machine.** — Une machine ne produit pas d'énergie par elle-même mais elle est capable de transformer l'énergie d'une forme en une autre plus pratique à utiliser ou à transporter.

---

(1) Chaque nouvelle **grandeur** ou **unité** écrite pour la première fois sera suivie de son **symbole** entre parenthèses.

(2) Valeur approchée par défaut.



2° L'énergie reçue par une machine s'appelle « énergie absorbée » ( $W_a$ ).

L'énergie restituée par la machine sous la *forme désirée* s'appelle « énergie utile » ( $W_u$ ).

3° **Quelques exemples :** Un *radiateur électrique* reçoit de l'énergie électrique et restitue de l'énergie thermique (fig. 1).

Un *générateur électrique* reçoit de l'énergie mécanique et restitue de l'énergie électrique et de l'énergie thermique (fig. 2).

Un *moteur électrique* reçoit de l'énergie électrique et restitue de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique (fig. 3).

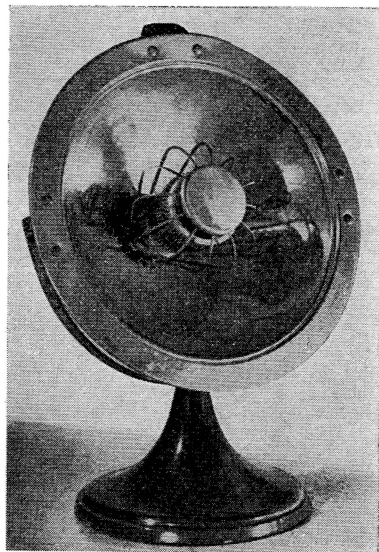
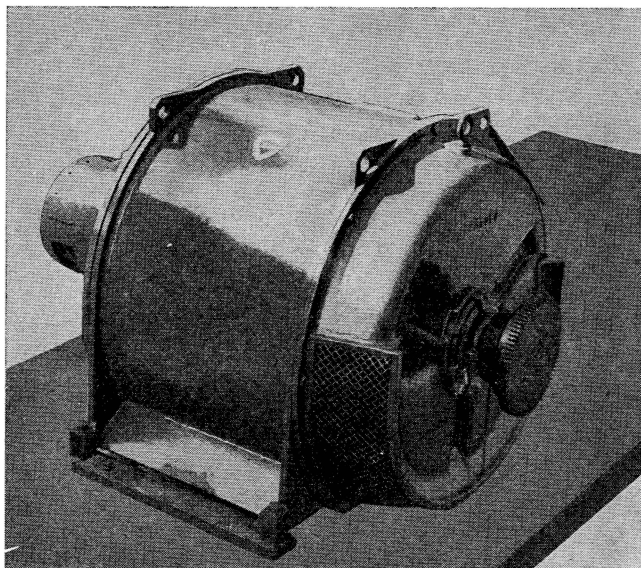
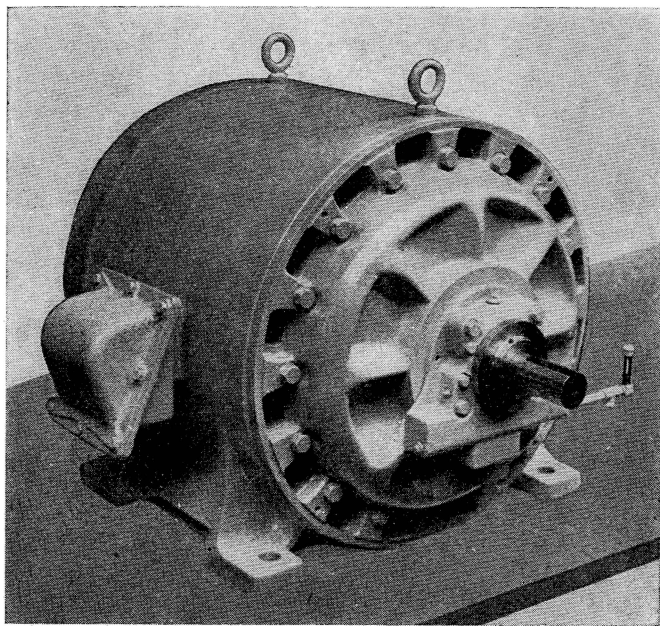


Fig. 1. — Radiateur électrique.



(Photo S.W. — Champagne/Seine).

Fig. 2. — Générateur électrique (Alternateur).



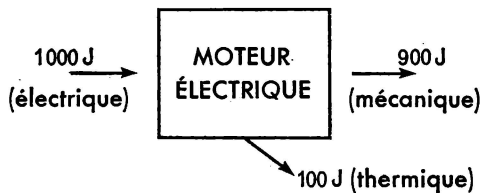
(Photo S.W. — Champagne /Seine)

Fig. 3. — Moteur électrique.

## 8. Principe de conservation <sup>(1)</sup>.

**1° Énoncé.** — Lorsqu'une énergie est transformée, d'une forme en une ou plusieurs autres formes, la somme des quantités d'énergie obtenues est égale à la quantité d'énergie initiale.

**2° Exemple :**



On a bien :  $1\ 000 = 900 + 100$

(1) Un principe ne se démontre pas, il est vérifié par l'ensemble de ses conséquences.

## 9. Principe de dégradation.

1<sup>o</sup> **Énoncé.** — Au cours d'une transformation d'énergie d'une forme en une autre il y a toujours apparition d'énergie thermique même si cette forme d'énergie n'est pas celle qui est désirée!

2<sup>o</sup> **Conséquences.** — CAS GÉNÉRAL. — La quantité d'énergie obtenue sous la *forme désirée* est toujours *inférieure* à la quantité d'énergie mise en jeu initialement (voir exemple du § précédent).

CAS DU CHAUFFAGE. — Toute l'énergie mise en jeu peut être transformée en chaleur.

## 10. Interprétation des deux principes.

1<sup>o</sup> Le principe de dégradation semble contredire celui de conservation, il n'en est rien.

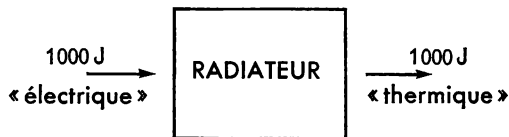
Le principe de *conservation* se borne à constater une *égalité d'énergies* sans se préoccuper de la forme obtenue; le principe de *dégradation* le complète en précisant que, sauf dans le cas du chauffage, il est *impossible* d'obtenir une *transformation totale* dans la forme désirée.

De plus, quel que soit le cas, il y a toujours *dégradation* parce que l'énergie thermique est la forme la moins intéressante de l'énergie (on verra au Tableau III, page 16, que c'est l'énergie thermique que l'on transforme avec le plus faible rendement).

Enfin, dans le cas où elle n'est pas désirée, l'énergie thermique est de l'énergie *perdue*.

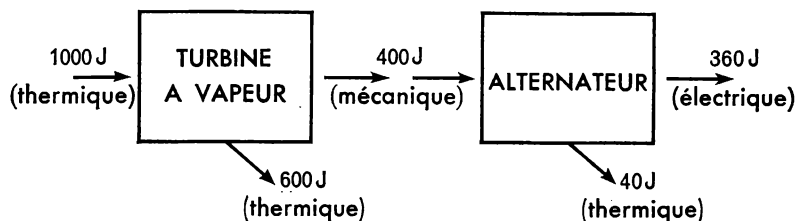
### 2<sup>o</sup> Exemples :

CAS 1 : Transformation d'énergie électrique en énergie thermique.



La transformation est totalement effectuée en la forme désirée; il y a néanmoins dégradation la « qualité thermique » étant inférieure à la « qualité électrique ».

**CAS 2 :** *Transformation d'énergie thermique en énergie électrique :* il faut passer par l'intermédiaire de l'énergie mécanique, à chaque transformation une partie de l'énergie thermique initiale se retrouve à nouveau (et le plus souvent définitivement) sous forme thermique.



**BILAN DE L'OPÉRATION :** 1 000 J « thermique » ont donné 360 J « électrique » et 640 J « thermique ».

On voit que :

- il y a bien conservation de l'énergie;
- il a été impossible de transformer la totalité de l'énergie thermique en énergie électrique.

**3° Formule.** — Dans toute transformation d'énergie on peut écrire :

$$\text{énergie absorbée} = \text{énergie utile} + \text{énergie perdue}$$

étant entendu que l'on considère comme énergie **utile** l'énergie obtenue sous la forme **désirée** et comme énergie **perdue** l'énergie **thermique**, le cas du chauffage faisant exception. On retiendra donc :

$$(1) \quad \boxed{W_a = W_u + W_p}$$

## 11. Rendement ( $\eta$ ).

**1° DÉFINITION.** — Le rendement d'une machine est le rapport de l'énergie utile qu'elle restitue à l'énergie totale qu'elle absorbe.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}}$$

$$(2) \quad \boxed{\eta = \frac{W_u}{W_a}}$$

2° **Remarques.** I. — Le rendement est un rapport de deux grandeurs physiques de même nature, c'est donc un nombre abstrait (sans unité) et *non une énergie*.

II. — L'énergie utile est plus petite que l'énergie absorbée, le rendement est donc plus petit que l'unité :

$$W_u < W_a \quad \text{donc} \quad \eta < 1$$

III. — On exprime de préférence le rendement en pour cent (%). Par exemple, un rendement de 0,82 est un rendement de 82 %, on a donc, puisque  $\eta < 1$  :

$$\eta < 100 \%$$

IV. — Dans le cas exceptionnel où l'énergie utile est thermique et où elle est totalement fournie là où on désire l'utiliser, le rendement est égal à l'unité soit 100 %. C'est le cas du radiateur électrique, *mais non celui du chauffage au charbon à cause de la chaleur emportée par les fumées*.

3° La formule 2 peut s'écrire :

$$a) W_u = W_a \times \eta \quad b) W_a = \frac{W_u}{\eta}$$

nous pourrons ainsi, selon les données du problème, calculer l'énergie utile ou l'énergie absorbée.

4° **Unités.** — Quelle que soit la formule employée, l'énergie utile et l'énergie absorbée doivent être exprimées avec la même unité.

## 12. Avantages de l'énergie électrique.

1° Sa production facile à partir de l'énergie mécanique.

2° Son *transport instantané* d'un lieu à un autre. Par exemple, l'énergie produite dans les Alpes est immédiatement utilisable à Paris.

3° Sa transformation en une autre forme quelconque est facile et se fait avec un excellent rendement.

4° Ses applications qui, sans elle, n'existeraient pas : radiodiffusion, télévision, rayons X, etc.

### 13. Compléments.

1° **Autres unités d'énergie.** — Outre les unités déjà citées, le joule, la calorie et le watt-heure, on utilise :

a) **Le kilojoule (kJ)**, multiple décimal du joule :

$$1 \text{ kJ} = 1\,000 \text{ J} = 10^3 \text{ J}$$

b) **Le kilowatt-heure (kWh)**, multiple décimal du watt-heure :

$$1 \text{ kWh} = 1\,000 \text{ Wh} = 10^3 \text{ Wh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

c) **Le gigawatt-heure (GWh)**, autre multiple décimal du watt-heure :

$$1 \text{ GWh} = 10^9 \text{ Wh} = 1 \text{ million de kWh}$$

d) **La thermie (th)**, multiple décimal de la calorie :

$$1 \text{ th} = 1\,000\,000 \text{ cal} = 10^6 \text{ cal} = 4,18 \cdot 10^6 \text{ J}$$

On remarque que la calorie est la millionième partie de la thermie c'est pourquoi on l'appelle aussi la microthermie ( $\mu\text{th}$ ).

e) **Le kilogrammètre (kgm)**, ancienne unité mécanique :

$$1 \text{ kgm} = 9,81 \text{ J}$$

2° **Ordre de grandeur des quantités d'énergie.** — Énergie en réserve dans une pile électrique usuelle :

$$4 \text{ Wh, soit } 14\,400 \text{ J}$$

Énergie en réserve dans une batterie d'accumulateurs d'automobile (12 V, 50 Ah) :

$$600 \text{ Wh soit environ } 2 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Consommation d'énergie électrique en France (1963) :

$$87 \text{ milliards de kWh ou } 87\,000 \text{ GWh}$$

ou encore

$$313 \cdot 10^{15} \text{ J} = 313\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ J!}$$

Nous retiendrons de ceci que le joule est une unité très petite, c'est cependant la plus pratique à utiliser dans le cours d'électricité.

3° **Données sur quelques sources d'énergie** (quantité d'énergie pouvant être fournie) :

TABLEAU I

| SOURCES                | QUANTITÉS      | ÉNERGIE FOURNIE |                    |
|------------------------|----------------|-----------------|--------------------|
|                        |                | Thermies        | Millions de joules |
| Charbon . . . . .      | kg             | 8               | 33,5               |
| Essence . . . . .      | l              | 10              | 41,8               |
| Gaz de ville . . . . . | m <sup>3</sup> | 4,25            | 17,8               |
| Gaz de Lacq. . . . .   | m <sup>3</sup> | 9               | 37,6               |
| Électricité . . . . .  | kWh            | 0,864           | 3,6                |

4° **Étude comparée des différentes sources :**

TABLEAU II

| SOURCES               | QUANTITÉS | PRIX <sup>(1)</sup><br>(en F) | ÉNERGIE<br>(en th) | COUT<br>DE LA<br>THERMIE <sup>(2)</sup> |
|-----------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| Charbon . . . . .     | kg        | 0,30                          | 8                  | 0,038                                   |
| Essence . . . . .     | l         | 1                             | 10                 | 0,10                                    |
| Gaz (ville ou Lacq).  | th        | 0,06                          | 1                  | 0,06                                    |
| Électricité . . . . . | kWh       | 0,15                          | 0,864              | 0,17                                    |

(1) A titre indicatif, ils peuvent varier suivant la quantité achetée et le lieu de l'achat.

(2) Il s'agit du coût de la thermie brute, celui de la thermie utile est plus élevé et varie avec le rendement de la machine transformatrice.

## 5° Ordre de grandeur de quelques rendements :

TABLEAU III

| ÉNERGIE<br>ABSORBÉE | MACHINES             | ÉNERGIE<br>UTILE | RENDEMENT <sup>(1)</sup> |
|---------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| Thermique . .       | Moteur à explosion   | mécanique        | 30 %                     |
|                     | Turbine à vapeur     | mécanique        | 40 %                     |
|                     | Chaudière domestique | thermique        | 60 %                     |
| Mécanique . .       | Alternateur          | électrique       | 95 %                     |
|                     | Dynamo               | électrique       | 90 %                     |
| Chimique. . .       | Pile                 | électrique       | 50 %                     |
|                     | Accumulateur         | électrique       | 65 %                     |
| Électrique . .      | Moteur               | mécanique        | 90 %                     |
|                     | Radiateur            | thermique        | 100 %                    |
|                     | Lampe à filament     | lumineuse        | 2 %                      |
|                     | Cuvé d'électrolyse   | chimique         | 70 %                     |

**PROBLÈMES**

*On reverra utilement, si cela est nécessaire, les notions de force et de travail rappelées à l'Appendice I, page 353, et les notions de chaleur rappelées à l'Appendice II, page 355, ainsi que les exercices correspondants.*

**I. AVEC SOLUTION.**

**1. 01.** — Un moteur fournit une énergie utile de 102 kWh, son rendement est de 85 %. Calculer : 1° L'énergie absorbée; 2° L'énergie perdue.

(1) A titre indicatif, il varie avec les dimensions de la machine et sa qualité.



## — SOLUTION —

$$1^{\circ}) \text{ Énergie absorbée : } W_a = \frac{W_u}{\eta} = \frac{102}{0,85} = 120 \text{ kWh}$$

$$2^{\circ}) \text{ Énergie perdue : } W_p = 120 - 102 = 18 \text{ kWh}$$

1. 02. — Un moteur consomme 12 litres d'essence en 1 h. Son rendement est de 28 %. Calculer l'énergie utile de ce moteur sachant que l'essence utilisée fournit 10 th par litre.

## — SOLUTION —

$$\text{Énergie absorbée : } W_a = 10 \times 12 = 120 \text{ th}$$

$$\begin{aligned} \text{Énergie utile : } W_u &= W_a \cdot \eta = 120 \times 0,28 = 33,6 \text{ th} \\ \text{soit } 4,18 \cdot 10^6 \times 33,6 &= 140 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned}$$

1. 03. — Une chute d'eau a une hauteur de 90 m et un débit de  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ , elle fait tourner une turbine dont le rendement est 80 %. Calculer :

1° L'énergie fournie en 1 h par la chute à la turbine;

2° L'énergie utile de la turbine pendant la même durée.

## — SOLUTION —

1°)  $12 \text{ m}^3$  ont une masse de 12 000 kg et un poids de :

$$F = 9,8 \times 12\,000 = 117\,600 \text{ N}$$

Énergie de la chute :

$$\text{pour } 1 \text{ s : } W = F \times l = 117\,600 \times 90 = 10,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\text{pour } 1 \text{ h : } W = 10,6 \cdot 10^6 \times 3\,600 = 38 \cdot 10^9 \text{ J}$$

2°) Énergie utile de la turbine :

$$W_u = W_a \times \eta = 38 \cdot 10^9 \times 0,8 = 30,4 \cdot 10^9 \text{ J}$$

## II. AVEC RÉPONSES NUMÉRIQUES.

1. 04. — Un alternateur fournit 20 millions de kWh en 400 h de fonctionnement. Calculer l'énergie qu'il absorbe en 1 h, sachant que son rendement est de 92 %.

Réponses : 54 300 kWh.

1. 05. — Une machine absorbe 100 000 th et restitue 70 000 kWh. Calculer :

1° Son rendement;

2° L'énergie perdue que l'on exprimera en joules.

Réponses : 60,5 %;  $163 \cdot 10^9 \text{ J}$ .

### III. A RÉSOUDRE.

---

1. 06. — Un radiateur absorbe 1 500 J en 1 s.

1<sup>o</sup> Quelle est, en watt-heures, l'énergie absorbée en 1 h?

2<sup>o</sup> Quelle est, en thermies, la quantité de chaleur correspondante?

1. 07. — Une turbine reçoit en 1 h une énergie de 4 millions de kgm. Calculer en joules et en kilowatt-heures l'énergie qu'elle restitue si son rendement est de 80 %.

1. 08. — Un moteur consomme chaque jour une énergie électrique de 92 kWh. La puissance perdue sous forme thermique est de 7 millions de calories. Calculer :

1<sup>o</sup> L'énergie restituée par le moteur (énergie utile);

2<sup>o</sup> Le rendement de ce moteur.

1. 09. — Une chute d'eau débite 10 m<sup>3</sup> en 1 s et a une hauteur de 42 m. Calculer en kilogrammètres et en kilowatt-heures l'énergie fournie par cette chute.

1<sup>o</sup> En 1 s;

2<sup>o</sup> Par journée de 24 h.

1. 10. — Pour chauffer un logement pendant tout un hiver il faut 12 000 th utiles c'est-à-dire libérées dans le logement. On peut choisir entre trois modes de chauffage :

1<sup>o</sup> Le charbon : 1 kg coûte 0,26 F et fournit 7,4 th; l'appareil de chauffage utilisé a un rendement de 60 %;

2<sup>o</sup> Le gaz : 1 m<sup>3</sup> coûte 0,25 F et fournit 4,25 th; l'appareil utilisé a un rendement de 80 %;

3<sup>o</sup> L'électricité : 1 kWh coûte 0,14 F et fournit 0,86 th; l'appareil utilisé a un rendement de 100 %.

Calculer dans chaque cas le coût total du chauffage.

---

## PUISSANCE

### 14. Insuffisance de la notion d'énergie.

Deux quantités égales d'énergie peuvent être absorbées par des machines très différentes mais avec des durées de fonctionnement également très différentes.

EXEMPLES. — Un moteur de locomotive absorbe 1 000 kWh en 2 h de fonctionnement;

— Un moteur de machine à laver peut aussi absorber 1 000 kWh, mais en 2 000 h de fonctionnement.

Ces deux moteurs ont donc consommé la même énergie, ils sont pourtant très différents l'un de l'autre. Pour les comparer nous allons considérer l'énergie qu'ils consomment en des **temps égaux**.

### 15. Notion de puissance.

1<sup>o</sup> DÉFINITION. — La puissance d'une machine se mesure par l'énergie qu'elle absorbe (ou fournit) dans l'unité de temps.

Dans les deux exemples précédents on trouve :

PREMIER MOTEUR : 1 000 kWh en 2 h, soit 500 kWh par heure;

DEUXIÈME MOTEUR : 1 000 kWh en 2 000 h, soit 0,5 kWh par heure.  
La puissance du premier est 1 000 fois celle du deuxième.

2<sup>o</sup> Calcul. — La puissance se calcule en divisant l'énergie par le temps correspondant.

$$\text{Puissance} = \frac{\text{énergie}}{\text{temps}}$$

d'où la formule <sup>(1)</sup> :

$$(3) \quad \boxed{P = \frac{W}{t}} \quad \left\{ \begin{array}{l} W \text{ en joules} \\ t \text{ en secondes} \\ P \text{ en watts} \end{array} \right.$$

## 16. Unités de puissance.

**1<sup>o</sup> Unité légale : le watt (W).** — Le watt est la puissance d'une machine qui absorbe (ou fournit) une énergie de 1 J en 1 s

$$\text{Soit symboliquement : } 1 \text{ W} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ s}}$$

**2<sup>o</sup> Autres unités :**

**a) Le kilowatt (kW) :**

$$1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$$

**b) Le mégawatt (MW) :**

$$1 \text{ MW} = 1\,000\,000 \text{ W} = 10^6 \text{ W}$$

**c) Le kilogrammètre par seconde (kgm/s) :**

$$1 \text{ kgm/s} = \frac{1 \text{ kgm}}{1 \text{ s}} = 9,81 \text{ W}$$

**d) Le cheval-vapeur (ch).** — Unité conventionnelle encore utilisée pour les moteurs <sup>(2)</sup> :

$$1 \text{ ch} = 75 \text{ kgm/s} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$$

## 17. Ordre de grandeur de quelques puissances.

Lampe de poche : 0,7 W.

Lampe d'éclairage : 100 W.

Radiateur électrique : 1 000 W.

Moteur de locomotive : 500 kW.

Gros générateur d'énergie électrique : 100 000 kW.

(1) Nous faisons suivre la formule du jeu d'unités le plus usuel.

(2) Pour les moteurs à essence on utilise le cheval fiscal qui n'a aucune correspondance avec les autres unités.

Puissance globale de tous les générateurs électriques installés en France (en 1963) : 23 millions de kW.

### 18. Puissance absorbée et puissance utile.

1° Nous avons vu que, quelle que soit la durée de fonctionnement, on a toujours :

$$\text{énergie absorbée} = \text{énergie utile} + \text{énergie perdue.}$$

En particulier si l'on considère une durée égale à l'unité de temps on peut substituer les puissances aux énergies correspondantes et l'on obtient :

$$\text{puissance absorbée} = \text{puissance utile} + \text{puissance perdue}$$

$$(4) \quad \boxed{P_a = P_u + P_p}$$

→ Il y a conservation de la puissance comme il y a conservation de l'énergie.

2° **Rendement.** — Le rendement peut se calculer avec les puissances :

$$\text{rendement} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance absorbée}}$$

$$(5) \quad \boxed{\eta = \frac{P_u}{P_a}}$$

$P_u$  et  $P_a$  étant évidemment exprimées avec la même unité.

Si l'on cherche la puissance utile, la formule 5 s'écrit :

$$P_u = P_a \times \eta$$

et si l'on cherche la puissance absorbée :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta}$$

### 19. Calcul de l'énergie.

La formule du § 15  $P = \frac{W}{t}$  peut s'écrire :

$$W = P \cdot t \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts} \\ t \text{ en secondes} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$$

elle permet de trouver l'énergie (ou le travail) quand on connaît la puissance et le temps.

**REMARQUE :** En 1 s une machine de 1 W fournit une énergie de 1 J ;  
En 1 h (3 600 s) elle fournit une énergie :

$$W = 1 \times 3\,600 = 3\,600 \text{ J}$$

Si l'on conserve le temps en heures on peut écrire :

$$W = 1 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1 \text{ Wh}$$

ce qui explique la relation de la leçon précédente :

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$$

On dispose donc d'un second jeu d'unités pour la formule :

$$W = P \cdot t \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts} \\ t \text{ en heures} \\ W \text{ en watt-heures} \end{array} \right.$$

## **PROBLÈMES**

### **I. AVEC SOLUTION.**

**2. 01. —** Un moteur dont la puissance utile est 18 ch absorbe une puissance de 20 kW. Calculer son rendement.

— SOLUTION —

Puissance utile :  $P_u = 0,736 \times 18 = 13,2 \text{ kW}$

Rendement :  $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{13,2}{20} = 0,66 = 66 \%$

**2. 02. —** Une chute d'eau de 50 m de hauteur débite 6 m<sup>3</sup> par seconde. Calculer sa puissance.

— SOLUTION —

$$6 \text{ m}^3 = 6\,000 \text{ l} \quad \text{soit} \quad 6\,000 \text{ kg d'eau}$$

Poids de l'eau :  $F = 9,8 \times 6\,000 = 58\,800 \text{ N}$

Travail effectué en une seconde :

$$W = F \cdot l = 58\,800 \times 50 = 2\,940\,000 \text{ J}$$

Puissance de la chute :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{2\,940\,000}{1} = 2\,940\,000 \text{ W}$$

**2. 03. —** Calculer l'énergie consommée en 15 mn par un fer à repasser de 700 W.

## — SOLUTION —

Énergie consommée :  $W = P \cdot t$   
 deux calculs sont possibles

a) Avec  $t$  en secondes

$$t = 60 \times 15 = 900 \text{ s} \quad W = 700 \times 900 = 630\,000 \text{ J}$$

b) Avec  $t$  en heures :

$$t = \frac{15}{60} = 0,25 \text{ h} \quad W = 700 \times 0,25 = 175 \text{ Wh}$$

On vérifiera sans peine que  $175 \text{ Wh} = 630\,000 \text{ J}$ .

II. AVEC RÉPONSES.

**2. 04.** — Une chute d'eau fait tourner une turbine dont le rendement est 80 %. Cette turbine entraîne un générateur d'énergie électrique dont le rendement est 90 %. Sachant que la chute a un débit de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  et une hauteur de 15 m calculer :

- 1° La puissance de la chute;
- 2° La puissance utile de la turbine (qui est également la puissance absorbée par le générateur);
- 3° La puissance utile du générateur;
- 4° Le rendement global de l'installation.

Réponses :  $2,94 \cdot 10^6 \text{ W}$  —  $2,35 \cdot 10^6 \text{ W}$  —  $2,12 \cdot 10^6 \text{ W}$  — 72 %.

**2. 05.** — Un générateur électrique dont le rendement est de 85 % fournit en 8 h une énergie de 16 320 kWh. Calculer sa puissance utile et sa puissance absorbée.

Réponses : 2 040 kW — 2 400 kW.

III. A RÉSOUDRE.

**2. 06.** — La puissance utile d'un générateur est 250 MW (1 mégawatt = 1 MW =  $10^6 \text{ W}$ ). Il fonctionne à pleine puissance 16 h par jour et 300 j par an. Calculer l'énergie qu'il fournit dans l'année et son prix si : le kilowatt-heure vaut 0,08 F.

**2. 07.** — Un moteur de 12 ch (puissance utile) consomme en 8 h une énergie de 92 kWh. Calculer son rendement.

**2. 08.** — La centrale souterraine de Brommat, dans l'Aveyron, est alimentée par une chute d'eau de 256 m de hauteur dont le débit est  $86 \text{ m}^3/\text{s}$ . Elle fait

tourner 6 groupes générateurs ayant chacun une puissance utile de 28 000 kW.  
Calculer :

- 1° La puissance de la chute (en ch et en kW);
- 2° Le rendement d'un groupe;
- 3° Le nombre d'heures de fonctionnement annuel si la production totale est de 800 millions de kWh (800 GWh).

**2. 09. —** Un groupe de secours comporte un générateur électrique entraîné par un moteur diesel. La puissance utile du générateur est 800 kW et son rendement 91 %. Le moteur diesel a un rendement de 32 %. Calculer la consommation horaire de carburant sachant qu'il fournit 11 th au litre.

**2. 10. —** La centrale de Lacq-Artix est alimentée au gaz de Lacq (9 th/m<sup>3</sup>). Le générateur a une puissance utile de 125 MW et un rendement de 94 %. En admettant que 35 % de l'énergie libérée par le gaz est absorbée par le générateur, calculer la consommation de gaz par heure de fonctionnement.

---



## LE COURANT ÉLECTRIQUE

### 20. Générateur (d'énergie électrique).

1<sup>o</sup> **Rôle.** — Il transforme en énergie électrique l'énergie qu'il reçoit sous une autre forme quelconque. Bien entendu une partie de l'énergie reçue est perdue sous forme thermique (dégradation, voir fig. 4).

2<sup>o</sup> Noms de quelques générateurs et formes d'énergie empruntée :

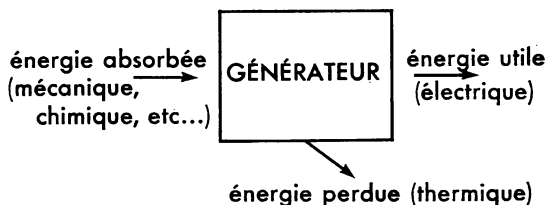
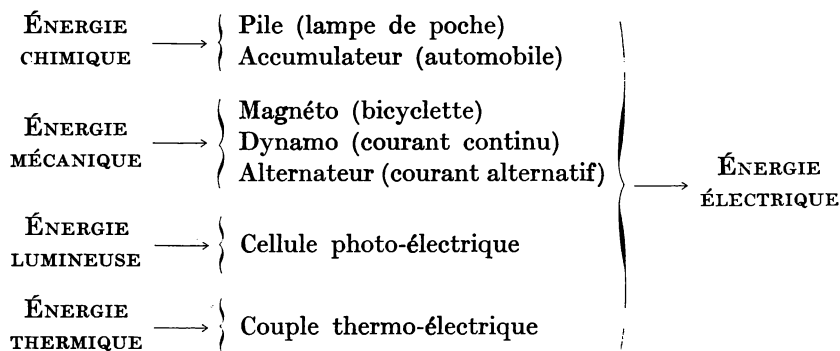


Fig. 4.



3<sup>o</sup> L'étude des générateurs sera effectuée plus tard, nous avons juste à savoir qu'un générateur peut fournir de l'énergie électrique et qu'il possède deux bornes par lesquelles nous pouvons prélever cette énergie. Au début du cours nous utiliserons une batterie d'accumulateurs comme générateur.

## 21. Récepteur (d'énergie électrique).

1° **Rôle.** — Il transforme l'énergie électrique qu'il reçoit en une autre forme quelconque. Bien entendu, une partie de l'énergie reçue est perdue sous forme thermique (dégradation, voir fig. 5).

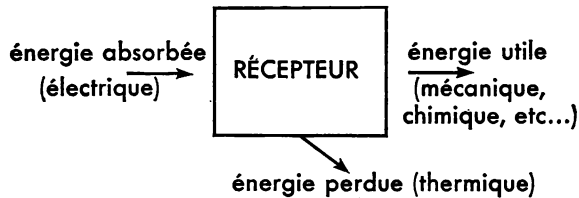
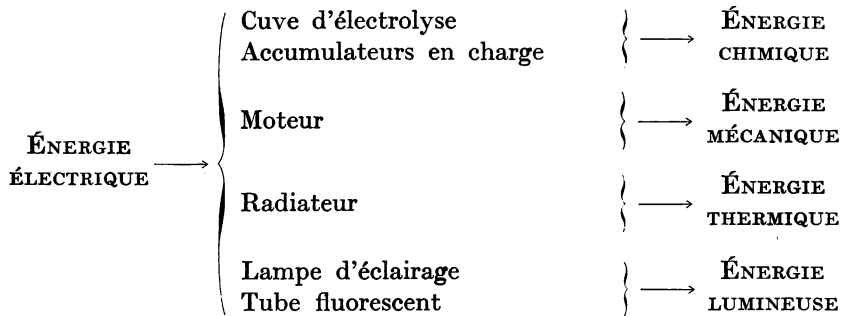


Fig. 5.

2° Noms de quelques récepteurs et formes d'énergie restituée :



3° L'étude des récepteurs sera effectuée plus tard, nous avons juste à savoir qu'un récepteur absorbe de l'énergie électrique et qu'il possède deux bornes par lesquelles nous pouvons lui fournir cette énergie.

## 22. Autres éléments d'un circuit électrique.

1° **Ligne.** — Elle sert à transporter l'énergie électrique du générateur au récepteur, en courant continu elle comporte deux fils métalliques (cuivre). Le courant électrique « s'écoule » dans la ligne comme l'eau dans un tuyau.

2° **Interrupteur** (fig. 6 et 6 bis). — Il permet, comme un robinet, l'établissement ou la suppression du courant dans le circuit. Noter cependant la différence de vocabulaire, en électricité :

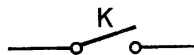
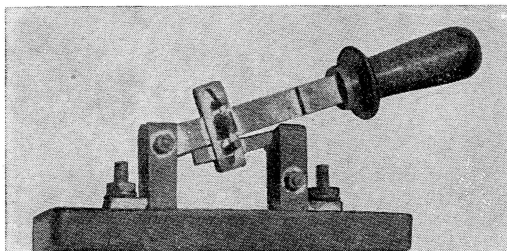


Fig. 6 et 6 bis. — Interrupteur et son symbole.

« *Fermer l'interrupteur* » correspond à l'établissement du courant;

« *Ouvrir l'interrupteur* » correspond à la suppression du courant.

3° **Protection.** — Dans tout circuit électrique on doit prévoir un ou plusieurs dispositifs destinés à couper instantanément le circuit en cas de danger. Le plus simple de ces dispositifs est le fusible qui en fondant ouvre le circuit.

4° **Schéma d'un circuit électrique.** — C'est un dessin donnant une représentation conventionnelle du montage. Chaque élément y est représenté par un **symbole**. Chaque fois que nous rencontrerons un nouvel

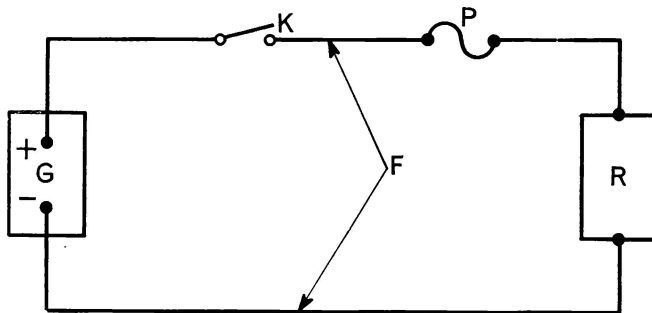


Fig. 7.

G : générateur.  
F : fils de ligne.  
K : interrupteur.  
P : protection.  
R : récepteur.

appareil nous donnerons son symbole. En attendant nous représenterons les appareils par un croquis rappelant leur aspect. On trouvera ainsi, figure 7, le croquis du circuit électrique le plus simple.

A l'avenir, pour alléger, nous ne représenterons plus la protection mais, il est entendu que, chaque montage en comporte au moins une.

## 23. Principaux effets du courant électrique.

1<sup>o</sup> **Matériel utilisé.** — *Source.* — Une batterie d'accumulateurs de 12 V (fig. 8, 8 bis et 8 ter).

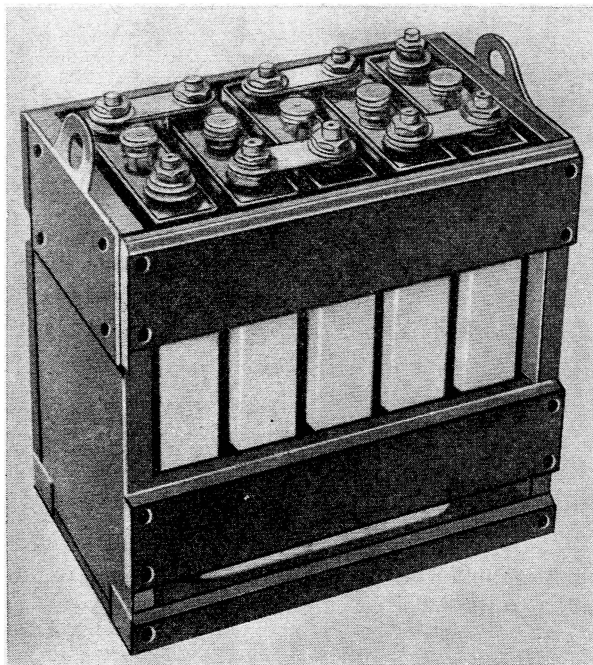


Photo SAFT.

Fig. 8. — Accumulateur (6 V.).

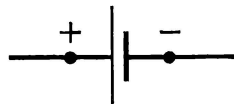


Fig. 8 bis.  
Symbole d'un élément.

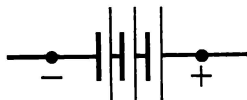


Fig. 8 ter.  
Symbole d'une batterie.

*Récepteurs.* — a) Une lampe d'éclairage de 6 V, quelques watts, ampoule d'automobile par exemple (fig. 9 et 9 bis).

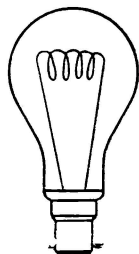


Fig. 9 et 9 bis. — Lampe et son symbole.

b) Une cuve comportant deux électrodes et contenant une solution de soude : cette cuve est appelée voltamètre (fig. 10 et 10 bis).

c) Un fil rectiligne et rigide, en cuivre, sous lequel est placée une boussole.

2<sup>o</sup> **Montage.** — On trouvera figure 11 un schéma descriptif.

3<sup>o</sup> **Expérience.** — Fermons l'interrupteur et observons. Nous constatons trois effets différents du courant électrique.

a) *Effet thermique.* — Le filament de la lampe rougit, le courant électrique chauffe les conducteurs dans lesquels il passe.

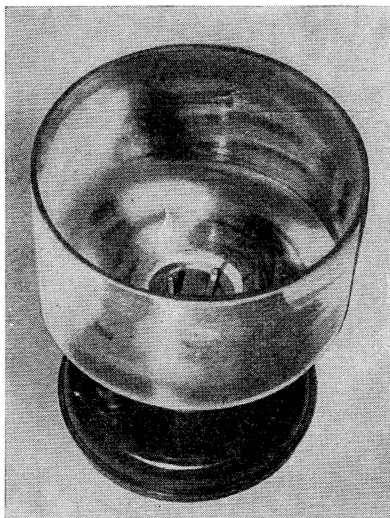


Fig. 10 et 10 bis. — Voltamètre et son symbole.

b) *Effet chimique.* — Un dégagement gazeux se produit dans chacune des deux éprouvettes du voltamètre; les deux gaz obtenus sont facilement identifiables.

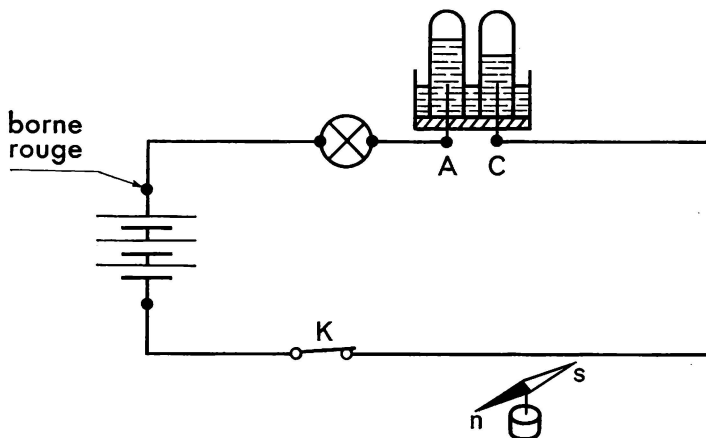


Fig. 11.

*A l'électrode A.* — On obtient un gaz dans lequel une allumette ne présentant plus qu'un point rouge se rallume, ce gaz est de l'oxygène.

*A l'électrode C.* — On obtient un gaz inflammable, ce gaz est de l'hydrogène.

Le courant électrique produit des décompositions chimiques <sup>(1)</sup>.

c) *Effet magnétique.* — L'aiguille aimantée placée sous le fil dévie. elle se met en croix avec celui-ci.

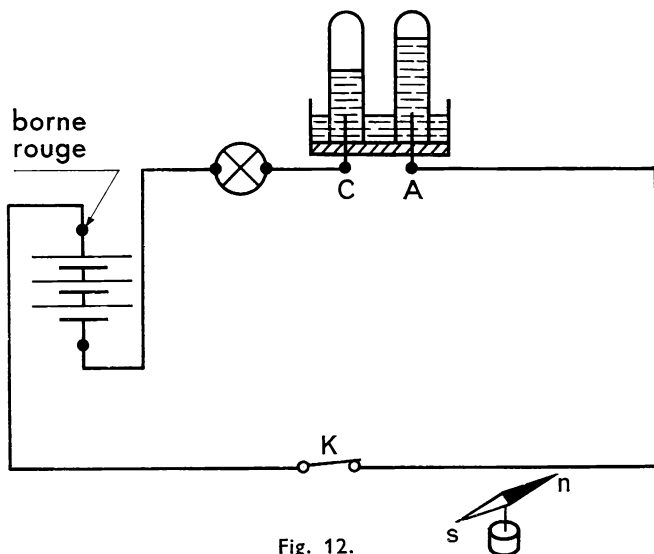


Fig. 12.

## 24. Pôles d'un générateur.

1° Permutons les deux fils qui arrivent aux bornes du générateur et observons à nouveau les phénomènes (fig. 12).

2° Nous constatons que :

a) *Effet thermique.* — Le filament de la lampe rougit de la même façon.

b) *Effet chimique.* — Les dégagements gazeux sont *permutés*.

c) *Effet magnétique.* — L'aiguille aimantée dévie en *sens inverse*.

(1) Son rôle exact sera précisé plus tard.

3° **Classification des effets.** — L'effet *a*) est inchangé quand on permute les bornes ou pôles de la batterie, cet effet n'est pas polarisé.

Les effets *b*) et *c*) sont inversés, ils sont polarisés.

4° **Repérage des bornes du générateur.** — Nous choisissons l'effet chimique pour ce repérage. Nous avons recueilli de l'*oxygène* sur l'électrode du voltamètre qui est reliée à la borne *rouge* du générateur, nous appellerons pôle « plus » cette borne, l'autre borne sera le pôle « moins ».

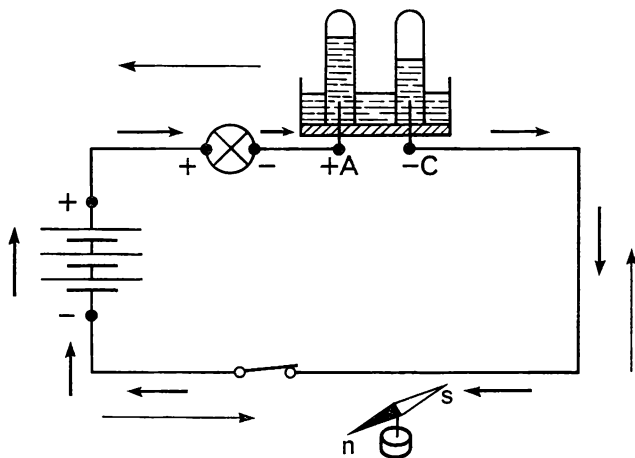


Fig. 13. — Sens n° 1 (conventionnel) : flèches courtes et grosses;  
sens n° 2 (électronique) : flèches longues et maigres.

5° **Bornes des récepteurs.** — La polarité d'un récepteur est imposée par celle du générateur. Le pôle plus d'un récepteur est celui qui est directement relié au pôle plus du générateur ou qui s'en trouve le plus rapproché.

Pour un voltamètre l'électrode **positive** est appelée **anode (A)** et l'électrode **négative** est appelée **cathode (C)**.

## 25. Sens du courant électrique (fig. 13).

1° **Sens conventionnel.** — Lors des premiers balbutiements de l'électricité, faute de connaître la nature exacte du courant électrique, on a choisi *au hasard mais logiquement* un sens pour le courant.

On pensait alors que le courant électrique était dû à des particules *positives* en mouvement, le sens choisi fut donc le **sens N° 1**, du pôle plus vers le pôle moins à l'extérieur du générateur.

**2° Sens réel** (dit électronique). — On sait aujourd'hui que ce sont des particules *néglatives* qui se déplacent, elles vont donc en sens *inverse* du N° 1, soit dans le *sens N° 2*.

Le sens N° 1 restera pour nous le sens conventionnel.

Le sens N° 2 ne sera rappelé qu'en cas de nécessité.

Il faut bien comprendre que ces deux sens ne sont nullement contradictoires puisqu'ils concernent des particules de signes contraires; **mieux**, ces deux déplacements se rencontrent parfois simultanément, dans l'électrolyse, par exemple.

**3° Retenons le sens conventionnel.** — *Le courant électrique va du pôle plus vers le pôle moins à l'extérieur du générateur et du pôle moins vers le pôle plus à l'intérieur (continuité du courant).*

## 26. Conducteurs et isolants.

**1° Conducteurs.** — Les métaux, les électrolytes, etc., qui se laissent traverser par le courant électrique sont des « **conducteurs** ».

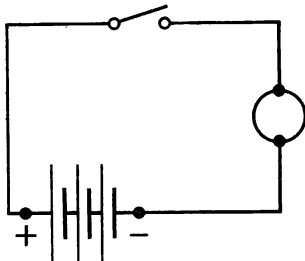


Fig. 14. — Le circuit est interrompu par l'air (interrupteur ouvert), la lampe reste éteinte.

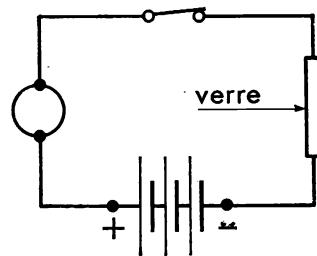


Fig. 15. — Le circuit est interrompu par la baguette en verre, la lampe reste éteinte.

**2° Isolants.** — Au contraire le caoutchouc, le verre, l'air, etc., sont des isolants, le courant électrique ne les traverse pas. Insérés dans un circuit électrique ils constituent « *une coupure* » (fig. 14 et 15).



# INTENSITÉ D'UN COURANT

## 27. Expérience.

1° **Montage.** — Montons les uns à la suite des autres, nous dirons « en série », plusieurs voltamètres ayant des dimensions et des formes quelconques mais contenant tous de la soude en solution (fig. 16).

2° **Expérience.**  
— Fermons l'interrupteur K et attendons quelques minutes. Comparons alors les volumes  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  d'hydrogène recueilli à la cathode des différents voltamètres. Ils sont égaux :

$$V_1 = V_2 = V_3$$

3° **Interprétation.** — L'effet du

courant électrique a été le même tout au long du circuit. Nous dirons que les trois voltamètres ont été traversés par la même quantité d'électricité ( $Q$ ) :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

4° **Conséquences.** — Nous pouvons mesurer la quantité d'électricité qui est passée dans un circuit par le volume, ou mieux, par la masse, d'hydrogène dégagé à la cathode d'un voltamètre.

Plus généralement, nous pourrons mesurer une quantité d'électricité par la masse de métal déposé à la cathode d'un voltamètre contenant un électrolyte quelconque (voir chap. 19).

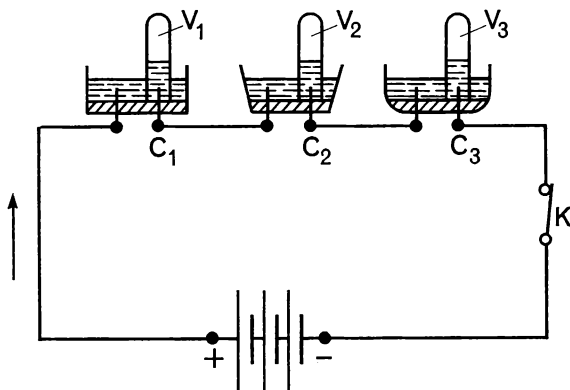


Fig. 16. — Les volumes d'hydrogène sont égaux.

## 28. Unité de quantité, le coulomb (C).

1° **Choix.** — Pour des raisons de commodité de mesure et de précision la référence choisie n'est pas l'hydrogène mais l'*argent* recueilli sur la cathode d'un voltamètre à nitrate d'argent.

2° DÉFINITION <sup>(1)</sup>. — Le coulomb est la quantité d'électricité qui, traversant un voltamètre à nitrate d'argent, dépose à la cathode une masse de 1,118 mg (milligramme) d'argent.

$$1 \text{ C} \rightarrow 1,118 \text{ mg Ag}$$

## 29. Mesure de la quantité d'électricité.

1° Avec un voltamètre à nitrate d'argent, on trouve la quantité d'électricité en divisant la masse recueillie par 1,118 :

$$Q = \frac{M}{1,118} \quad (M \text{ en milligrammes})$$

2° Il existe des appareils mesurant directement la quantité d'électricité, ce sont les compteurs de quantité d'électricité.

## 30. Notion d'intensité (I).

1° Au cours des expériences qui ont été faites nous avons pu constater que la quantité d'électricité dépendait de la durée de passage du courant dans le voltamètre. Pour comparer l'importance relative de deux courants il nous faut considérer la quantité d'électricité transportée par chacun d'eux dans un même temps, quantité que nous appellerons intensité (I).

2° DÉFINITION. — L'intensité d'un courant électrique a même mesure que la quantité d'électricité transportée dans l'unité de temps.

3° **Formule.** — Si le courant transporte 1 200 C en 500 s son intensité est :

$$1\,200 \text{ C} / 500 \text{ s} = 2,4 \text{ C/s}$$

---

(1) Définition provisoire.

Pour trouver l'intensité d'un courant il faut diviser la quantité d'électricité par la durée de passage du courant.

$$(6) \quad \boxed{I = \frac{Q}{t}} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en coulombs} \\ t \text{ en secondes} \\ I \text{ en ampères} \end{array} \right.$$

4<sup>o</sup> **Unité.** — *L'ampère (A).* — L'ampère est l'intensité d'un courant électrique qui transporte 1 coulomb en 1 seconde :

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

5<sup>o</sup> La formule 6 s'écrit suivant les besoins :

$$I = \frac{Q}{t} \quad Q = It \quad t = \frac{Q}{I}$$

### 31. Mesure de l'intensité.

1<sup>o</sup> La définition de l'intensité suggère la mesure de la quantité avec un voltamètre et celle du temps avec un chronomètre, le quotient des deux mesures donnant l'intensité. Ce procédé est précis mais peu pratique.

2<sup>o</sup> **Avec un ampèremètre.** — L'ampèremètre (fig. 17 et 17 bis) est un appareil destiné à mesurer les intensités; nous en apprendrons, dans ce chapitre, l'utilisation mais non le fonctionnement.

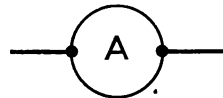
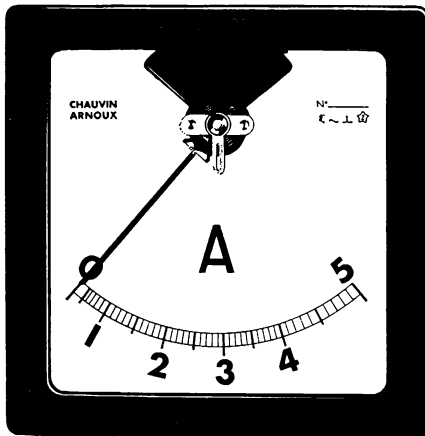


*Photo Chauvin Arnoux.*

Fig. 17 et 17 bis. — Ampèremètre et son symbole.

**3° Montage d'un ampèremètre.** — Nous savons que des appareils montés en série sont traversés par la même quantité d'électricité (§ 27). Le temps de passage du courant étant aussi le même, il en résulte que l'intensité est la même également.

Dans un montage en série l'intensité est la même tout au long du circuit.

Donc, pour mesurer l'intensité qui traverse un appareil, nous monterons l'*ampèremètre en série* avec lui en un point quelconque du circuit (fig. 18).

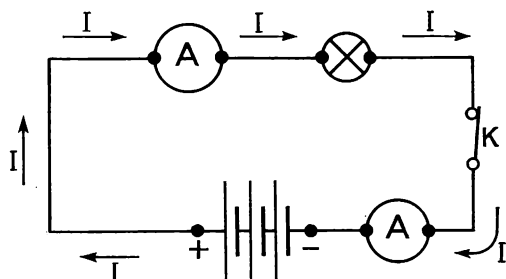


Fig. 18. — Les deux ampèremètres donnent la même indication.

### 32. Montage en dérivation.

**1° Montage.** — Avec les trois voltamètres de la première expérience réalisons le montage de la figure 19.

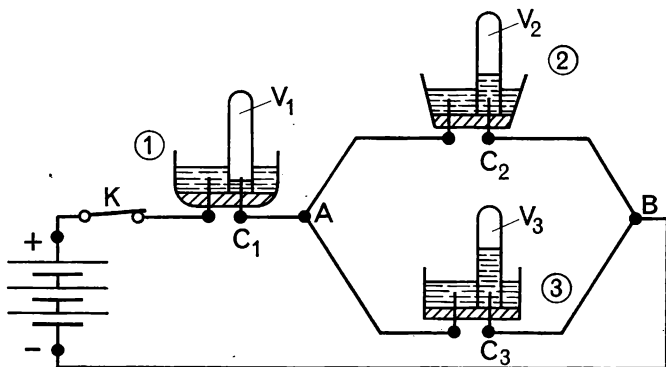


Fig. 19. — On trouve  $V_1 = V_2 + V_3$ .

La portion de circuit extérieure à la portion AB est appelée circuit principal. Entre A et B se trouvent deux dérivation.

Les voltmètres N° 2 et N° 3 sont montés en « dérivation » ou en « parallèle ».

**2° Expérience.** — Fermons l'interrupteur et attendons quelques minutes, nous constatons alors que :

$$V_2 \neq V_3 ; \quad V_1 > V_2 ; \quad V_1 > V_3$$

enfin, une mesure correcte des trois volumes nous montre que :

$$V_1 = V_2 + V_3$$

**3° Interprétation.** — Nous dirons que la quantité d'électricité qui a traversé le premier voltmètre est égale à la somme des deux autres :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

D'autre part, le temps de passage du courant étant le même pour tout le circuit, nous aurons une relation identique pour les courants : **le courant dans le circuit principal est égal à la somme des courants qui passent dans les dérivation :**

$$(7) \quad \boxed{I_1 = I_2 + I_3}$$

### 33. L'ampère-heure.

Un courant de 1 A transporte en 1 s une quantité d'électricité de 1 C. En 1 h il transporte 3 600 C.

Nous appellerons ampère-heure (Ah) cette dernière quantité d'électricité :

$$1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$$

### 34. Ordre de grandeur de quelques intensités.

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| Lampe d'éclairage               | 0,1 à 5 A |
| Moteur de machine-outil         | 10 A      |
| Moteur de locomotive électrique | 500 A     |
| Générateur d'énergie électrique | 5 000 A   |

## PROBLÈMES

---

### I. AVEC SOLUTIONS.

4. 01. — Dans un voltamètre à nitrate d'argent on recueille 1 g d'argent en 10 mn. Calculer : 1° La quantité d'électricité qui est passée dans le circuit ; 2° L'intensité du courant.

— SOLUTION —

1°) 1 C dépose 1,118 mg d'argent, d'où la quantité d'électricité :

$$Q = \frac{M}{1,118} = \frac{1\,000}{1,118} = 895 \text{ C}$$

2°) Intensité : 
$$I = \frac{Q}{t} = \frac{895}{600} = 1,49 \text{ A}$$

4. 02. — On monte en série un voltamètre à nitrate d'argent et un voltamètre contenant une solution de soude. Dans le premier on recueille 0,559 g d'argent et dans le second un volume de 58 cm<sup>3</sup> d'hydrogène.

Quelle quantité d'électricité faut-il pour obtenir un volume de 11,2 litre d'hydrogène?

— SOLUTION —

Quantité d'électricité passée dans le circuit :

$$Q = \frac{559}{1,118} = 500 \text{ C}$$

Quantité pour 11,2 l d'hydrogène (11 200 cm<sup>3</sup>)

$$Q' = 500 \times \frac{11\,200}{58} = 96\,500 \text{ C}$$

4. 03. — Entre deux points A et B d'un circuit il y a deux dérivations. Dans l'une d'elles il est passé 400 C en 250 s ; dans l'autre un ampèremètre indique 2,4 A. Quel est le courant dans le circuit principal?

— SOLUTION —

Premier courant :

$$I_1 = \frac{Q}{t} = \frac{400}{250} = 1,6 \text{ A}$$

Courant principal :

$$= I_1 + I_2 = 1,6 + 2,4 = 4 \text{ A}$$

## II. AVEC RÉPONSES NUMÉRIQUES.

4. 04. — Deux voltamètres sont montés en série. Dans l'un on recueille 425 mg d'argent et dans l'autre 125 mg de cuivre. Calculer la masse de cuivre qui serait déposée par 96 500 C.

Réponse : 31,8 g.

4. 05. — Une lampe électrique est traversée par 300 C en 10 mn ; elle consomme 66 000 J pendant ce temps.

Calculer en watt-heures l'énergie qu'elle consomme et en ampère-heures la quantité d'électricité qui la traverse pour 1 h de fonctionnement.

Réponses : 0,5 Ah — 110 Wh.

## III. A RÉSOUDRE.

4. 06. — Deux voltamètres sont en dérivation. Dans le premier on recueille 170 cm<sup>3</sup> d'hydrogène et dans le second 95 cm<sup>3</sup> du même gaz.

1<sup>o</sup> Calculer la quantité d'électricité qui a traversé le circuit principal ;

2<sup>o</sup> L'expérience ayant duré 7 mn, calculer l'intensité du courant.

N. B. — Utiliser les résultats du problème 4. 02.

4. 07. — Calculer la masse d'argent déposée en 15 mn dans le voltamètre de la figure 20.

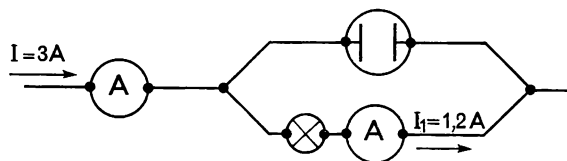


Fig. 20.

4. 08. — Un circuit principal se divise en trois dérivation.

Dans la première un ampèremètre indique 2 A.

Dans la seconde on obtient 302 mg d'argent en 3 mn.

Calculer le courant dans la troisième dérivation sachant que le circuit principal est traversé par une quantité d'électricité de 13 Ah en 2 h.

4. 09. — Il faut environ 10 700 C pour obtenir 1 g d'aluminium. Combien faut-il d'ampère-heures pour en obtenir 1 t ?

4. 10. — Un moteur de laminoir est traversé par un courant de 1 500 A pendant 8 h. Calculer la quantité d'électricité correspondante en coulombs et en ampère-heures.

## NATURE D'UN COURANT ÉLECTRIQUE

### 35. Structure de l'atome.

1° On sait (cours de seconde) qu'un corps pur est formé de molécules, toutes identiques. Les molécules étant elles-mêmes constituées par un ou plusieurs atomes suivant le corps considéré.

Au centre de l'atome est situé un noyau autour duquel gravitent des électrons planétaires. Entre le noyau et les électrons c'est le *vide absolu*. La figure 21 donne quelques représentations d'atomes.

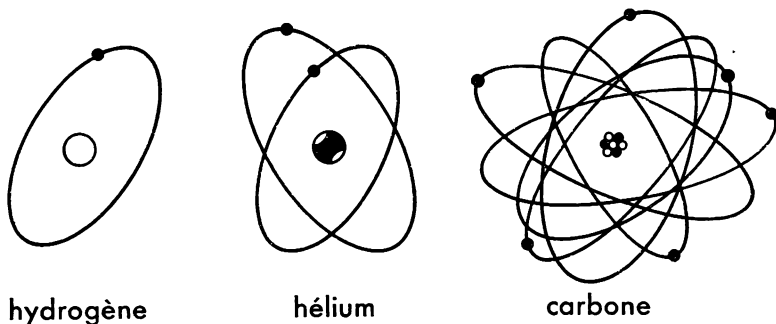


Fig. 21.

2° **Le noyau.** — Toute la masse de l'atome y est pratiquement concentrée. Son diamètre est à peu près la dix-millième partie de celui de l'atome.

Il est constitué de particules neutres appelées **neutrons** et de particules positives appelées **protons**. Le noyau d'hélium, par exemple, possède deux neutrons et deux protons (fig. 22).



3° **Les électrons.** — Leur masse est négligeable devant celle du noyau. On peut les considérer comme des *grains indivisibles* d'électricité **négative**.

Leurs trajectoires délimitent le volume occupé par l'atome (volume d'encombrement).



4° **Les charges.** — La charge d'un électron est négative et égale à  $-e$  avec :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Cette quantité d'électricité est la plus petite qui puisse exister.

La charge d'un proton est  $+e$  donc égale, en valeur absolue, à celle de l'électron.

Le *nombre d'électrons* d'un atome est égal au *nombre de protons*; ce nombre, appelé *nombre atomique*, est désigné par la lettre **Z**.

La charge d'un atome est donc :

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| pour les protons   | $+ Ze$                        |
| pour les électrons | $- Ze$                        |
| soit au total      | $\underline{\quad = 0 \quad}$ |

Un atome, dans son état normal, est **électriquement neutre**.

5° **Représentation schématique des atomes.** — Le noyau ne nous intéressant que pour sa charge nous le représenterons par un simple cercle au centre de l'atome (fig. 23).

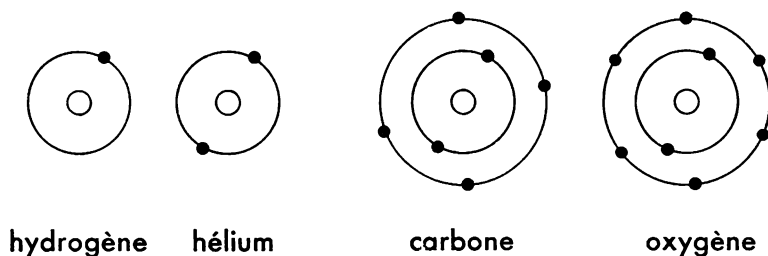


Fig. 23.

6° **Différence de mobilité des deux espèces d'électricité.** — Le noyau le plus léger a une masse égale à 1 840 fois celle d'un électron! On s'explique sans peine que les déplacements de charges négatives soient beaucoup plus fréquents que ceux des charges positives (et aussi plus rapides).

### 36. Conducteurs et isolants.

1° **Isolants.** — Dans les isolants les électrons ne peuvent pas (ou ne peuvent que très difficilement) passer d'un atome à l'autre. Les électrons d'un isolant sont des électrons liés.

**2° Conducteurs.** — Dans les métaux certains électrons sont également liés, d'autres, au contraire, sont très mobiles et passent facilement d'un atome à l'autre : ce sont les **électrons libres**.

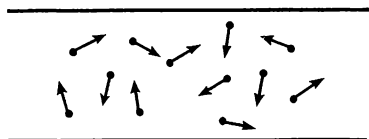


Fig. 24. — Électrons libres.

Ces derniers étant situés à la périphérie de l'atome sont dits périphériques (en chimie on les appelle électrons de valence).

Les électrons libres sont en incessante agitation : ils se déplacent en tout sens de manière désordonnée (fig. 24). Si l'on considère un plan quelconque coupant le métal, dans un temps donné, aussi petit soit-il, ce plan est traversé par le même nombre d'électrons dans chaque sens, il n'en résulte aucun courant.

### 37. Générateur.

Un générateur possède et entretient un *excès* d'électrons sur son pôle négatif et un *manque* d'électrons sur son pôle positif.

Si on réunit les deux bornes d'un générateur par un conducteur (fil métallique) l'excès d'électrons qui existe au pôle négatif exerce une *pression* sur les électrons libres du conducteur.

A l'agitation désordonnée de ceux-ci se superpose un mouvement d'ensemble vers le pôle positif du générateur : c'est ce mouvement qui constitue le courant électrique dans les conducteurs métalliques (fig. 25).

Le rôle du générateur est très exactement celui d'une pompe : il aspire les électrons extérieurs par son pôle positif et les refoule intérieurement vers son pôle négatif.

### 38. Vitesse des électrons.

La vitesse de déplacement des électrons est extrêmement faible : de l'ordre de 0,1 mm/s soit à peine 10 m par jour.

Il ne faut pas confondre cette vitesse avec ce que l'on appelle communément la « vitesse de l'électricité » et qui est extrêmement élevée : 300 000 km/s dans l'air. Cette dernière est la vitesse de *propagation de l'onde électrique* ou, si l'on veut, la vitesse avec laquelle se transmet le mouvement des électrons.

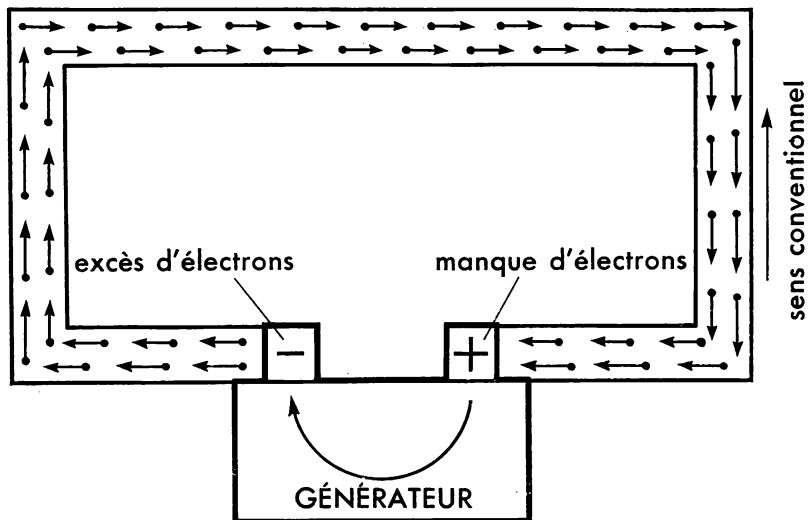


Fig. 25. — Les électrons en mouvement dans un conducteur métallique

Une comparaison grossière, mais simple, nous aidera à comprendre.

Dans une gouttière (conducteur), plaçons côte à côte des billes (électrons) (fig. 26). Poussons très lentement la bille A : presque instantanément toutes les billes sont en mouvement...

... La vitesse de déplacement des billes est petite,

... La vitesse à laquelle le mouvement s'est propagé est grande.

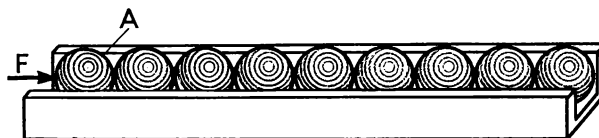


Fig. 26.

## EXERCICES

### AVEC SOLUTION.

5. 01. — Calculer le nombre d'électrons correspondant à 1 C.

— SOLUTION —

$$n = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

5. 02. — Même question pour 96 500 C.

$$N = 6,25 \cdot 10^{18} \times 96\,500 = 6,03 \cdot 10^{23}$$

NOTA. — On remarque que l'on retrouve le nombre d'Avogadro.

5. 03. — Un appareil est traversé par un courant de 4 A. Par combien d'électrons est-il traversé en 1 millionième de seconde ( $\mu s$ )?

— SOLUTION —

Quantité d'électricité par  $\mu s$  :

$$Q = It = 4 \times 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

Nombre d'électrons :

$$n = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ électrons}$$

NOTA. — On remarquera combien ce nombre est considérable malgré la petitesse du temps.

N. B. — Étant donné la nature particulière de cette leçon nous ne donnons pas de problèmes à résoudre.

---

## DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

### 39. Circuit hydraulique.

1<sup>o</sup> **Même niveau.** — Réunissons par un tuyau deux réservoirs d'eau aussi grands que l'on veut, mais tels que leurs plans d'eau soient au même niveau : jamais une seule goutte d'eau ne s'écoulera spontanément d'un réservoir dans l'autre (fig. 27).

*Il ne peut y avoir de courant d'eau sans différence de niveau.*



Fig. 27. — Il ne peut y avoir de courant d'eau sans différence de niveau.

2<sup>o</sup> **Niveaux différents.** — Supposons maintenant les deux plans d'eau à des niveaux différents : A plus élevé que B. L'eau s'écoule de A vers B jusqu'à ce que les surfaces d'eau dans les deux réservoirs soient au même niveau (fig. 28).

*La différence de niveau permet d'obtenir un courant d'eau.*

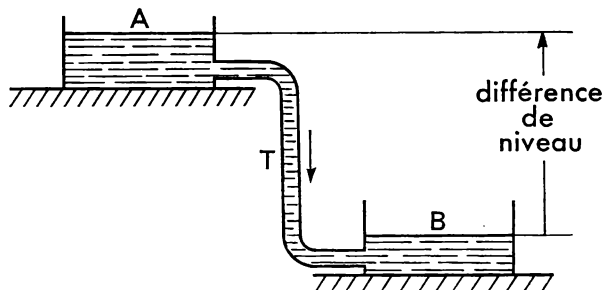


Fig. 28. — La différence de niveau permet d'obtenir un courant d'eau.

**3° Entretien du courant.** — Si l'on veut entretenir le courant d'eau il faut pomper de l'eau du réservoir B et la renvoyer dans le réservoir A, autrement dit il faut entretenir la différence de niveau entre les deux réservoirs. Dès lors un courant d'eau pourra circuler en *permanence* de A vers B dans le tuyau T (fig. 29).

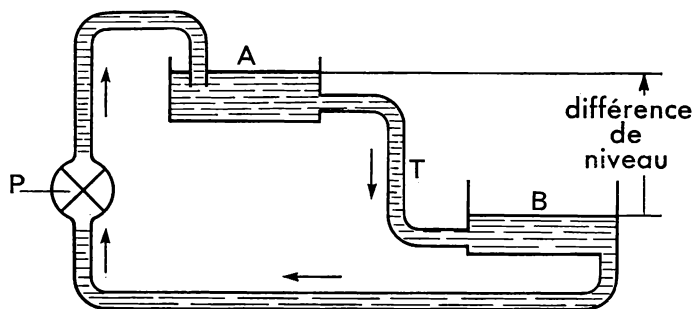


Fig. 29. — La pompe P entretient la différence de niveau donc le courant.

#### 40. Calcul de l'énergie.

L'eau en tombant produit de l'énergie (travail) que nous pouvons calculer :

$$W = F \cdot l$$

$F$  : poids de l'eau en newtons;

$l$  : hauteur de chute ou différence de niveau en mètres;

$W$  : énergie en joules.

Inversement la différence de niveau se calcule en divisant l'énergie produite par la quantité d'eau (poids).

$$l = \frac{W}{F}$$

**REMARQUE.** — Pour une quantité d'eau unitaire (1 N) on a  $F = 1$ , l'énergie et la différence de niveau sont alors exprimées par le même nombre (mais avec des unités différentes).

#### 41. Circuit électrique.

Il y a quelques analogies entre un circuit électrique et le circuit hydraulique décrit ci-dessus.

**1° Même niveau électrique.** — Si l'on réunit par un fil métallique (conducteur) deux points qui ne sont reliés à aucun générateur électrique, il n'y a aucun courant électrique : parce que, entre les deux points, il n'y a aucune « différence de niveau électrique » (fig. 30).

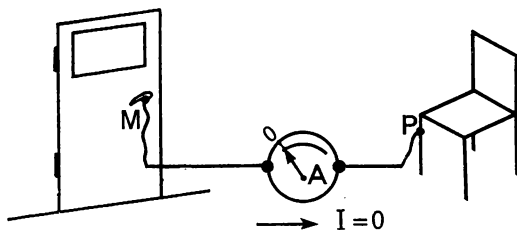


Fig. 30. — La poignée de la porte et le pied de la chaise étant au même niveau électrique il ne peut y avoir de courant.

**2° Niveaux électriques différents.** — Si les deux points sont l'un le pôle positif d'un générateur, l'autre le pôle négatif, le fil qui les relie est traversé par un courant et cela parce que entre les deux points il y a une « différence de niveau électrique » (fig. 31).

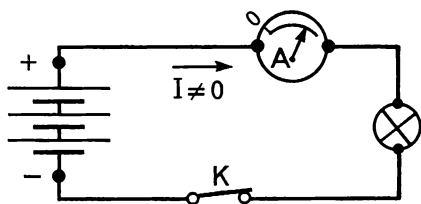


Fig. 31. — La différence de niveau électrique des deux pôles permet d'obtenir un courant.

### 3° Entretien du courant.

— Si le générateur est capable d'entretenir cette différence de niveau électrique, le courant peut circuler indéfiniment; sinon le courant durera jusqu'à ce que les deux pôles soient au même niveau (c'est le cas d'une pile qui est déchargée au bout de quelques heures).

Cette différence de niveau électrique a reçu un nom : **différence de potentiel**, que l'on écrit ddp en abrégé et dont le symbole est  $U$ .

De ce qui précède nous retiendrons :

« Pas de courant, ni d'énergie, sans différence de potentiel ».

## 42. Différence de potentiel.

**1° DÉFINITION.** — La différence de potentiel entre deux points d'un circuit se mesure par l'énergie, exprimée en joules, que transporte chaque coulomb qui passe entre ces deux points; énergie d'un coulomb et différence de potentiel sont donc exprimées par le même nombre <sup>(1)</sup>.

(1) Comparer avec la remarque du paragraphe 40.

EXEMPLE. — Si 20 C fournissent 100 J, chaque coulomb fournit :  
 $100 \text{ J} / 20 \text{ C} = 5 \text{ J/C}$

2° **Calcul.** — On calcule donc la différence de potentiel en divisant l'énergie par la quantité d'électricité, d'où la formule <sup>(1)</sup> :

$$(8) \quad \boxed{U = \frac{W}{Q}} \quad \left\{ \begin{array}{l} W \text{ en joules} \\ Q \text{ en coulombs} \\ U \text{ en J/C (volts)} \end{array} \right.$$

3° **Unités de différence de potentiel.** — a) *Unité légale.* — Le joule par coulomb est appelé **volt (V)**. *Le volt est la différence de potentiel entre deux points d'un circuit où chaque coulomb, en passant, fournit une énergie de 1 J.*

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ C}$$

b) *Autres unités.* — Multiples et sous-multiples décimaux :

Le mégavolt (MV) :  $1 \text{ MV} = 1\,000\,000 = 10^6 \text{ V}$

Le kilovolt (kV) :  $1 \text{ kV} = 1\,000 = 10^3 \text{ V}$

Le millivolt (mV) :  $1 \text{ mV} = 0,001 = 10^{-3} \text{ V}$

Le microvolt ( $\mu\text{V}$ ) :  $1 \mu\text{V} = 0,000\,001 = 10^{-6} \text{ V}$

4° La formule 8 s'écrit selon les besoins :

$$U = \frac{W}{Q} \quad W = UQ \quad Q = \frac{W}{U}$$

REMARQUE. — Outre les unités données au 2° on peut exprimer Q en ampère-heures et W en watt-heures, la différence de potentiel U restant en volts.

#### 43. Ordre de grandeur de quelques différences de potentiel.

|                                               |              |
|-----------------------------------------------|--------------|
| Pile ronde (un élément) . . . . .             | 1,5 V        |
| Pile « ménage » (trois éléments) . . . . .    | 4,5 V        |
| Accumulateurs d'automobile . . . . .          | 6; 12; 24 V  |
| Générateur continu (dynamo) . . . . .         | 500 V        |
| Générateur alternatif (alternateur) . . . . . | 5 000 V      |
| Ligne « haute tension » . . . . .             | 380 kV       |
| Usages domestiques . . . . .                  | 127 et 220 V |

REMARQUE. — Le mot **tension** est couramment employé à la place de différence de potentiel. Par contre le mot « *voltage* » doit être prohibé.

(1) Comparer avec le paragraphe 40.



#### 44. Mesure de la différence de potentiel.

Une différence de potentiel se mesure à l'aide d'un **voltmètre** (fig. 32 et 32 bis). Nous l'utiliserons sans en connaître le fonctionnement qui ne sera étudié que plus tard.

Un voltmètre se monte en dérivation (en parallèle) avec l'appareil dont on veut connaître la différence de potentiel. Autrement dit, les bornes du voltmètre doivent être réunies aux deux points entre lesquels existe la différence de potentiel à mesurer (fig. 33).

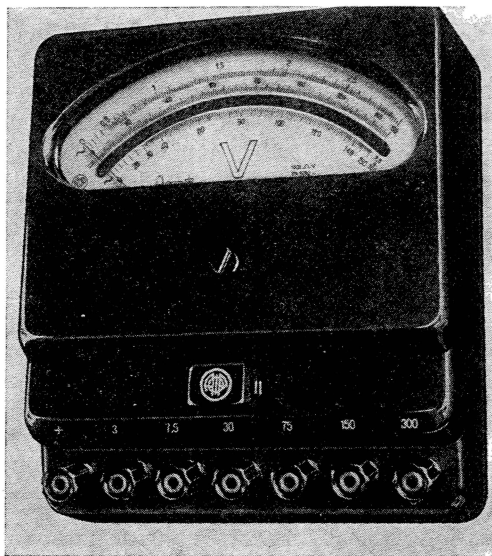


Photo AOIP.

Fig. 32 et 32 bis.  
Voltmètre  
et son symbole.

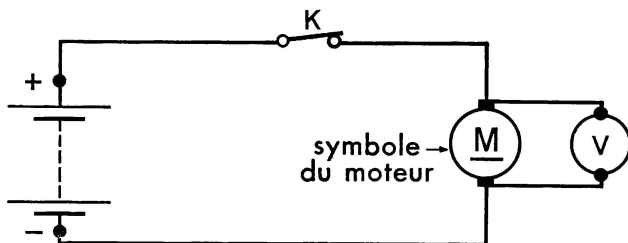


Fig. 33. — Mesure de la différence de potentiel du moteur *M*.  
(On notera le symbole du moteur).

#### 45. Notions de potentiel.

Il est parfois commode de parler de **potentiel (V)** en un point; par exemple on dit que la différence de potentiel entre A et B est égal au potentiel de A moins le potentiel de B :

$$U_B^A = V_A - V_B$$

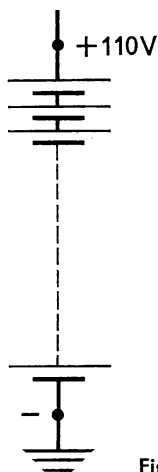


Fig. 34.

Le potentiel de la terre est conventionnellement pris égal à *zéro*. Si un générateur de 110 V a son pôle « moins » à la terre, son pôle « plus » a un potentiel de + 110 V (fig. 34). Si c'est le pôle « plus » qui est à la terre, le pôle « moins » est à - 110 V (fig. 35).

On remarquera l'analogie qui existe entre l'altitude et le potentiel d'une part et entre la différence de niveau et la différence de potentiel d'autre part.

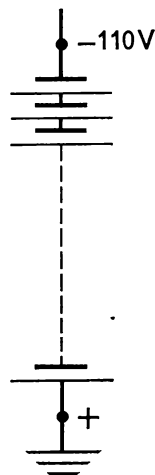


Fig. 35.

#### ***46. Importance de la différence de potentiel.***

**1° Générateur.** — Un générateur *entretient* entre ses bornes une **différence de potentiel** sensiblement constante. C'est elle qui permet au générateur de fournir de l'énergie électrique.

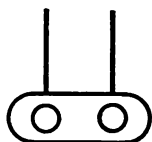


Fig. 36. — Symbole d'une prise de courant.

**2° Prise de courant** (fig. 36). — Entre les deux bornes d'une prise de courant il existe une différence de potentiel parce que cette prise est reliée, indirectement, à un générateur.

**3° Récepteur.** — Un récepteur est toujours prévu pour **fonctionner sous une différence de potentiel donnée**.

Si la différence de potentiel qu'on lui applique est plus élevée il risque d'être détérioré (« grillé »).

Si la différence de potentiel qu'on lui applique est plus faible il fonctionne mal et ne rend pas le service qu'on attend de lui.

Retenons que le courant qui traverse un appareil dépend de la différence de potentiel qu'on lui applique.

#### ***47. Montage de récepteurs en parallèle.***

Lorsque des récepteurs sont montés en parallèle, d'une part leurs bornes + sont réunies entre elles et forment une borne commune positive, d'autre part leurs bornes — sont aussi réunies entre elles et forment une borne commune négative.

Ces récepteurs ayant les mêmes bornes sont nécessairement soumis à la même différence de potentiel.

C'est en parallèle que sont montés tous les récepteurs d'une installation domestique (fig. 37 et 38) et tous les moteurs d'un même atelier.

Rappelons que dans un montage en parallèle le *courant total* est égal à la *somme des courants* de chaque dérivation (fig. 37).

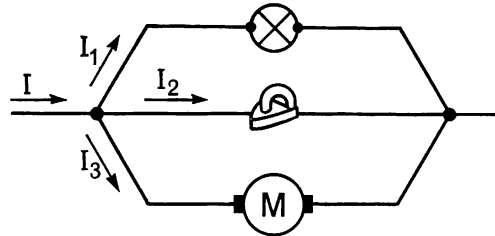


Fig. 37. — Montage de récepteurs dans une installation domestique.

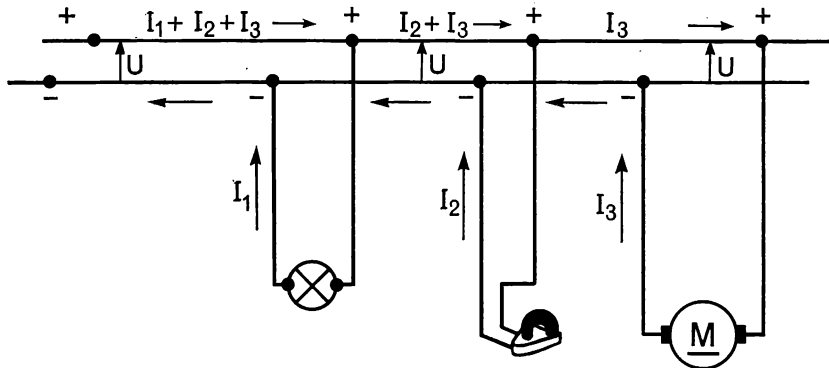


Fig. 38. — Ce montage est équivalent à celui de la figure 37.

#### 48. Montage en série.

Les récepteurs sont montés les uns à la suite des autres. La borne « plus » d'un récepteur est donc réunie à la borne « moins » du précédent :

Ainsi (fig. 39) A est le pôle + du récepteur 1; B est le pôle - du récepteur 1 et le pôle + du 2..., etc.

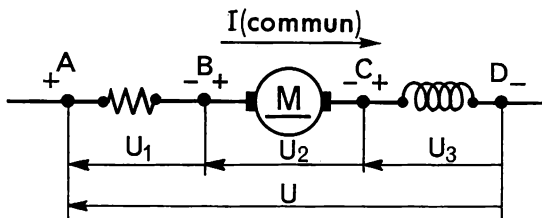


Fig. 39.

Écrivons que la tension de chaque récepteur est égale à la différence des potentiels de ses deux bornes :

$$U_1 = V_A - V_B$$

$$U_2 = V_B - V_C$$

$$U_3 = V_C - V_D$$

soit en additionnant :

$$U_1 + U_2 + U_3 = V_A - V_D = U$$

Dans un montage en série la différence de potentiel totale est égale à la somme des différences de potentiel.

Rappelons que *le courant est le même* tout au long du circuit.

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

**6. 01.** — Une lampe consomme en 8 h une énergie de 600 Wh, la différence de potentiel à laquelle elle est soumise est 120 V.

Calculer : 1° La puissance de la lampe; 2° La quantité d'électricité et le courant qui l'ont traversée.

— SOLUTION —

1° Puissance :

$$P = \frac{W \text{ (en Wh)}}{t \text{ (en h)}} = \frac{600}{8} = 75 \text{ W}$$

2° Quantité d'électricité :

$$600 \text{ Wh} = 3\,600 \times 600 \text{ J}$$

$$Q = \frac{W}{U} = \frac{3\,600 \times 600}{120} = 18\,000 \text{ C}$$

Intensité du courant :

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{18\,000}{3\,600 \times 8} = 0,625 \text{ A}$$

**6. 02.** — Un générateur débite un courant de 450 A pendant 5 h. L'énergie qu'il fournit pendant ce temps est 1 350 kWh. Calculer :

1° La puissance du générateur; 2° Sa différence de potentiel.

— SOLUTION —

1° Puissance :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1\,350}{5} = 270 \text{ kW} = 270\,000 \text{ W}$$

2° Différence de potentiel : calculons d'abord la quantité d'électricité :

$$Q = It = 450 \times 5 = 2\,250 \text{ Ah}$$

d'où la différence de potentiel :

$$U = \frac{W \text{ (en W.h)}}{Q \text{ (en A.h)}} = \frac{1\,350\,000}{2\,250} = 600 \text{ V}$$

**6. 03. —** On monte en séries trois récepteurs. Le courant qui les traverse est 4 A. Au bout de 5 mn ils ont consommé respectivement : 24 000 J, 42 000 J, et 66 000 J. Calculer la différence de potentiel qui existe entre les bornes de chaque récepteur et la différence de potentiel totale.

— SOLUTION —

Quantité d'électricité commune (5 mn = 300 s) :

$$Q = It = 4 \times 300 = 1\,200 \text{ C}$$

Différences de potentiel respectives :

$$U_1 = \frac{24\,000}{1\,200} = 20 \text{ V} \quad U_2 = \frac{42\,000}{1\,200} = 35 \text{ V} \quad U_3 = \frac{66\,000}{1\,200} = 55 \text{ V}$$

Différence de potentiel totale : la somme des différences de potentiel :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 20 + 35 + 55 = 110 \text{ V}$$

## II. AVEC RÉPONSES NUMÉRIQUES.

**6. 04. —** Un moteur électrique fonctionne sous une différence de potentiel de 220 V. Il consomme un courant de 15 A et fonctionne pendant 6 h. Calculer la quantité d'électricité qui a traversé le moteur, l'énergie qu'il a absorbée et sa puissance.

Réponses : 90 Ah = 324 000 C ; 71,28 . 10<sup>6</sup> J ; 3 300 W.

**6. 05. —** Une batterie d'accumulateurs débite un courant de 8 A sous une différence de potentiel de 12 V. Elle fournit ainsi une énergie de 672 Wh en un temps t. Calculer :

1<sup>o</sup> La quantité d'électricité fournie ; 2<sup>o</sup> Le temps t du débit ; 3<sup>o</sup> La puissance fournie.

Réponses : 56 Ah ; 7 h ; 96 W.

## III. A RÉSOUDRE.

**6. 06. —** Un radiateur a une puissance de 1 200 W et fonctionne sous une différence de potentiel de 120 V. Calculer :

1<sup>o</sup> L'énergie et la quantité d'électricité correspondant à 3 h de fonctionnement ; 2<sup>o</sup> L'intensité du courant absorbé.

**6. 07. —** Une pile peut fournir avant usure une quantité d'électricité de 3 Ah sous une différence de potentiel de 4,5 V. Calculer :

1° L'énergie totale emmagasinée dans la pile;

2° La puissance et l'intensité du courant débité si la pile est totalement usée en 5 h de fonctionnement.

**6. 08. —** Un générateur fournit un courant de 850 A sous une différence de potentiel de 550 V. Calculer la quantité d'électricité et l'énergie fournies par ce générateur en 24 h de fonctionnement. Quelle est sa puissance?

---

## ÉNERGIE ET PUISSANCE ÉLECTRIQUES

### 49. Énergie.

1<sup>o</sup> **Formule.** — La formule (8)  $W = UQ$ , du chapitre précédent, peut s'écrire en remplaçant la quantité d'électricité  $Q$  par le produit  $It$  :

$$(9) \quad \boxed{W = UIt}$$

Le tableau ci-dessous donne les deux jeux d'unités pour l'emploi de cette formule.

|   |   |   |    |
|---|---|---|----|
| U | I | t | W  |
| V | A | s | J  |
| V | A | h | Wh |

Dès que l'énergie calculée est grande il est préférable d'employer le watt-heure et ses multiples.

2<sup>o</sup> **Unités.** — a) *Unité légale*: le **joule (J)**. — Nous pouvons maintenant en donner une définition purement électrique :

*Le joule est l'énergie fournie entre deux points d'un circuit entre lesquels existe une différence de potentiel de 1 V quand il circule entre ces deux points un courant de 1 A pendant 1 s.*

b) *Autres unités (rappel) :*

Le kilojoule (kJ) : 1 kJ = 1 000 J

Le watt-heure (Wh) : 1 Wh = 3 600 J

Le kilowatt-heure (kWh) : 1 kWh = 1 000 Wh

Le gigawatt-heure (GWh) : 1 GWh =  $10^9$  Wh (1 million de kWh)

3° Selon les besoins la formule 9 s'écrit :

$$U = \frac{W}{It} \quad I = \frac{W}{Ut} \quad t = \frac{W}{UI} \quad W = UI t$$

## 50. Mesure de l'énergie.

L'énergie électrique se mesure avec un compteur watt-heuremètre.

1° **Description.** — C'est le compteur d'énergie qui se trouve dans tous les logements (fig. 40), on y lit par exemple :

Volts : 220; Ampères : 5;

Un tour de disque : 1,2 Wh.

En outre, parce que l'énergie est distribuée en courant alternatif, il y a aussi :

50 Hz

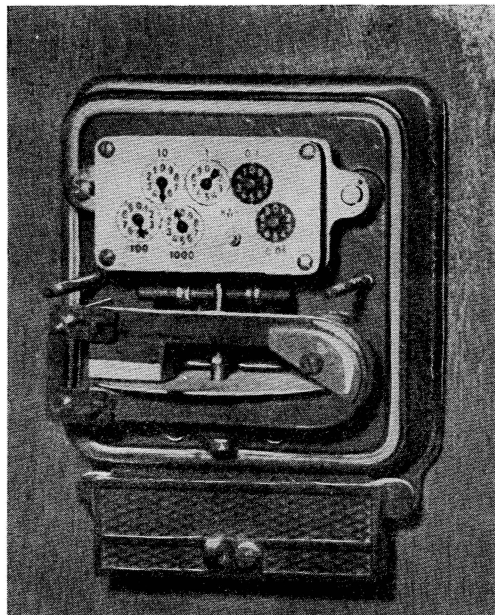


Fig. 40. — Compteur watt-heuremètre.

2° **Constante d'un compteur.** — Dans le bas du compteur on voit un disque en aluminium avec un repère noir; ce disque tourne lorsque des appareils sont en fonctionnement. L'énergie consommée lorsque le disque a fait un tour s'appelle **constante du compteur**, dans le cas ci-dessus la constante est de 1,2 Wh.



## 51. Ordres de grandeur d'énergie électrique.

Nous en avons déjà donnés au § 13 du chapitre 1. On trouvera ici la consommation hebdomadaire d'énergie électrique en France pour ces dernières années :

| Années         | GWh<br>(millions de kWh) |
|----------------|--------------------------|
| 1959 . . . . . | 1 250                    |
| 1960 . . . . . | 1 380                    |
| 1961 . . . . . | 1 470                    |
| 1962 . . . . . | 1 560                    |
| 1963 . . . . . | 1 670                    |

Le prix du kilowatt-heure varie suivant l'utilisation (époque, heure, région, quantité, usage) de 0,07 F à 0,32 F.

## 52. Puissance.

1° **Formule.** — La formule générale  $P = \frac{W}{t}$  est valable aussi en électricité; associée à la formule  $W = UIt$  elle nous donne :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI$$

(10)

$P = UI$

}

U en volts  
 I en ampères  
 P en watts

Cette formule est très importante. En courant continu, celui que nous étudions, elle s'applique sans restriction suivant la loi ci-dessous.

2° **Loi.** — La puissance mise en jeu entre deux points d'un circuit est égale au produit de la différence de potentiel qui existe entre les deux points par l'intensité du courant qui passe dans la portion de circuit comprise entre les deux points.

3° **Remarques.** — a) Toute portion de circuit comprise entre deux points et deux seulement est appelée « *dipôle* ».

b) Si la puissance « entre » dans le dipôle, le dipôle est récepteur; si la puissance « sort » du dipôle, le dipôle est générateur.

c) La loi dit « puissance mise en jeu » sans préciser si la puissance est fournie au dipôle (récepteur) ou si elle est fournie par le dipôle (générateur); c'est parce que la loi, et par suite la formule, s'appliquent toujours quel que soit le cas (fig. 41 et 42).

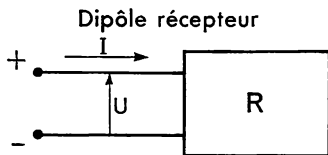


Fig. 41.

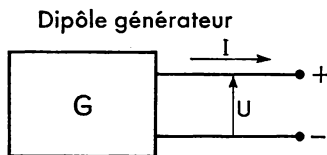


Fig. 42.

**4° Unités.** — a) *Unité légale : le watt (W).* — Nous pouvons maintenant en donner une définition purement électrique :

*Le watt est la puissance mise en jeu dans un dipôle ayant 1 V de différence de potentiel et traversé par un courant de 1 A.*

b) *Autres unités :* Le watt est la seule unité employée en électricité avec ses multiples et sous-multiples.

|                           |                            |             |
|---------------------------|----------------------------|-------------|
| Le mégawatt (MW) :        | 1 MW = 1 000 000 W . . . = | $10^6$ W    |
| Le kilowatt (kW) :        | 1 kW = 1 000 W . . . =     | $10^3$ W    |
| Le milliwatt (mW) :       | 1 mW = 0,001 W . . =       | $10^{-3}$ W |
| Le microwatt ( $\mu$ W) : | 1 $\mu$ W = 0,000 001 W =  | $10^{-6}$ W |

Rappelons que le cheval-vapeur est une unité tolérée :

$$1 \text{ ch} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$$

5° La formule (10) peut s'écrire :

$$U = \frac{P}{I} \quad P = UI \quad I = \frac{P}{U}$$

### 53. Mesure de la puissance.

1° Puisque  $P = UI$  on peut mesurer la puissance en effectuant le produit des indications d'un voltmètre et d'un ampèremètre (fig. 43).

2° Il existe un appareil qui effectue lui-même ce produit, c'est le **wattmètre** (fig. 44).

Le wattmètre possède quatre bornes : deux pour la tension et deux

Fig. 43. — Mesure de la puissance du moteur  $M$  avec un voltmètre et un ampèremètre.

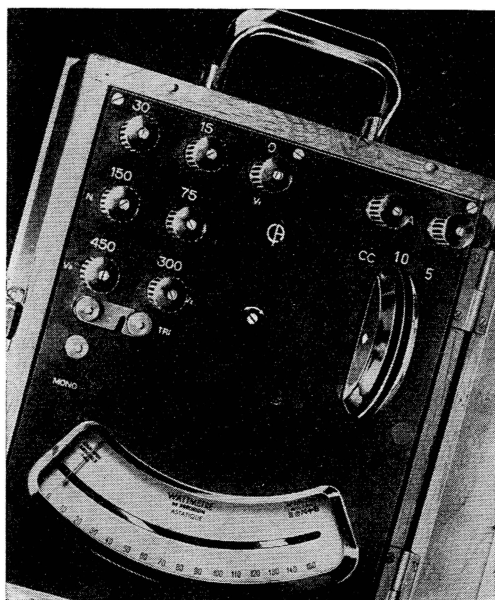
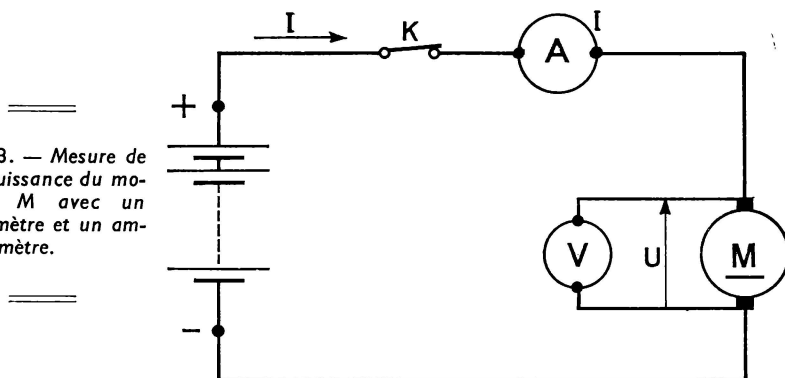
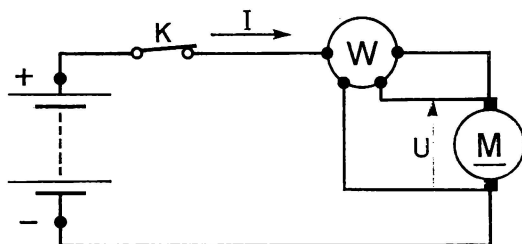


Photo Chauvin Arnoux.

Fig. 44. — Wattmètre.



Fig. 45. — Mesure avec un wattmètre de la puissance du moteur  $M$ .



pour le courant, ces dernières étant en général plus grosses que les premières. Le montage d'un wattmètre est donné figure 45.

On trouvera des ordres de grandeur de puissance au § 17 du chapitre 2.

#### **54. Calibres d'un appareil de mesure.**

**1<sup>o</sup> DÉFINITION.** — On appelle calibre d'un appareil de mesure la valeur de la grandeur mesurée qui correspond à la déviation maximale.

**2<sup>o</sup> Graduation d'un appareil.** — a) *L'appareil a un seul calibre.* — Une simple lecture donne immédiatement la valeur de la grandeur mesurée; c'est le cas de l'ampèremètre de la figure 17 (chap. 4) dont le calibre est 5 A. Chaque grande division correspond à 1 A et chaque petite à 0,1 A.

b) *L'appareil a plusieurs calibres: la valeur d'une division dépend du calibre choisi.* — Par exemple le voltmètre du chapitre 6 (fig. 32) a six calibres qui sont :

$$3 \text{ V}; 7,5 \text{ V}; 30 \text{ V}; 75 \text{ V}; 150 \text{ V}; 300 \text{ V}$$

d'autre part le cadran comporte 150 divisions.

Sur le calibre 7,5 V une division vaut donc :

$$\frac{7,5 \text{ V}}{150} = 0,05 \text{ V}$$

sur le calibre 300 V elle vaut :

$$\frac{300 \text{ V}}{150} = 2 \text{ V}$$

c) Le wattmètre est un cas particulier, il possède en général plusieurs calibres pour l'intensité et plusieurs calibres pour la tension. Le wattmètre de la figure 44 comporte 150 divisions. Choisissons les calibres 5 A et 75 V. La déviation maximale correspond à  $5 \times 75 = 375 \text{ W}$  donc pour une division on aura :

$$\frac{375 \text{ W}}{150} = 2,5 \text{ W}$$

## PROBLÈMES

---

### I. AVEC SOLUTION.

**7. 01. —** Un radiateur électrique de 2 750 W fonctionne sous une différence de potentiel de 220 V. Calculer :

- 1° L'intensité qui traverse ce radiateur ; — 2° L'énergie absorbée en 24 h ;  
— 3° Le coût de cette énergie à 0,13 F le kilowatt-heure.

— SOLUTION —

1° Intensité du courant :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2\,750}{220} = 12,5 \text{ A}$$

2° Énergie :

$$W = UIt = 220 \times 12,5 \times 24 = 66\,000 \text{ Wh} \\ = 66 \text{ kWh}$$

3° Coût :

$$C = 0,13 \times 66 = 8,58 \text{ F}$$

**7. 02. —** Un moteur électrique a une puissance utile de 11 ch, il fonctionne sous une différence de potentiel de 220 V et son rendement est de 80 %. Calculer :

- 1° La puissance absorbée par le moteur ; — 2° L'intensité du courant qui le traverse ; — 3° L'énergie perdue par minute de fonctionnement.

— SOLUTION —

1° Puissance absorbée :

1 ch = 736 W la puissance utile est donc :

$$P_u = 736 \times 11 = 8\,096 \text{ W}$$

d'où :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{8\,096}{0,8} = 10\,120 \text{ W}$$

2° Intensité du courant :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10\,120}{220} = 46 \text{ A}$$

3° Énergie perdue :

Puissance perdue :  $P_p = P_a - P_u = 10\,120 - 8\,096 = 2\,024 \text{ W}$ .

Énergie perdue :  $W_p = P_p t = 2\,024 \times 60 = 121\,440 \text{ J}$ .

**7. 03. —** On mesure la puissance consommée par un appareil à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

Le voltmètre comporte 150 divisions, le calibre utilisé est 300 V et la déviation est de 82 divisions.

L'ampèremètre comporte 10 divisions, le calibre utilisé est 20 A et la déviation est de 7,4 divisions.

1° Calculer la puissance consommée par l'appareil;

2° Quelle serait l'indication d'un wattmètre de 150 divisions si on l'utilise sur les calibres 300 V, 15 A?

— SOLUTION —

1° Puissance consommée :

a) Tension :  $U = 300 \times \frac{82}{150} = 164 \text{ V}$

b) Intensité :  $I = 20 \times \frac{7,4}{10} = 14,8 \text{ A}$

c) Puissance :  $P = UI = 164 \times 14,8 = 2\,430 \text{ W (environ)}$

2° Indication du wattmètre :

a) Puissance correspondant à la déviation maximale :

$$P_m = 300 \times 15 = 4\,500 \text{ W}$$

b) Puissance pour une division :

$$p = \frac{4\,500}{150} = 30 \text{ W}$$

c) Déviation :

$$d = \frac{2\,430}{30} = 81 \text{ divisions}$$

**7. 04. —** Pour mesurer la puissance d'un fer à repasser on le branche pendant 3 mn et on compte 17 tours de disque d'un compteur watt-heuremètre dont la constante est 0,8 Wh. Calculer la puissance du fer.

— SOLUTION —

Énergie consommée en 3 mn :

$$0,8 \times 17 = 13,6 \text{ Wh}$$

Énergie consommée en 1 h :

$$13,6 \times \frac{60}{3} = 272 \text{ Wh}$$

Puissance du fer :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{272}{1} = 272 \text{ W}$$

## 11. AVEC RÉPONSES.

**7. 05. —** Une pile de 9 V débite un courant de 0,01 A pendant 120 h.

Calculer : 1° La puissance de la pile ; — 2° L'énergie totale fournie ; — 3° Le coût du kilowatt-heure si la pile est achetée 2 F.

Réponses :  $P = 0,09 \text{ W}$  ;  $W = 10,8 \text{ Wh}$  ; coût = 185 F.

7. 06. — Un moteur électrique a une puissance utile de 6 ch, il consomme un courant de 24 A. En 8 h il absorbe une énergie de 44 kWh.

Calculer : 1° La puissance absorbée; — 2° Le rendement du moteur; — 3° La différence de potentiel sous laquelle il fonctionne.

Réponses :  $P_a = 5,5 \text{ kW}$ ;  $\eta = 80,3 \%$ ;  $U = 229 \text{ V}$ .

### III. A RÉDIGER.

7. 07. — Une lampe de 150 W fonctionne sous une différence de potentiel de 120 V. Calculer le courant qui la traverse et, en joules, l'énergie qu'elle consomme par minute.

7. 08. — Un générateur fonctionnant 6 000 h par an fournit un courant de 580 A sous une différence de potentiel de 5 000 V. Calculer :

1° La puissance fournie par le générateur;

2° L'énergie produite annuellement;

3° La puissance absorbée si le rendement est de 94 %.

7. 09. — Un radiateur de 1 500 W fonctionne sous une différence de potentiel de 120 V. Calculer :

1° L'intensité qui traverse ce radiateur; — 2° L'énergie absorbée en 24 h; — 3° La quantité de chaleur correspondante en thermies.

7. 10. — On effectue une mesure de puissance à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

Le voltmètre indique 73 divisions (calibre 150 V, 100 divisions au total).

L'ampèremètre indique 9,3 divisions (calibre 5 A, 10 divisions au total).

Calculer : 1° La puissance consommée; — 2° L'indication d'un wattmètre comportant 150 divisions et utilisé sur les calibres 5 A et 150 V.

7. 11. — Un moteur fonctionne sous une différence de potentiel de 240 V. Sa puissance utile est de 5 ch et son rendement 82 %. Calculer :

1° Sa puissance absorbée; — 2° Le courant qui le traverse.

## LOI DE JOULE

### 55. Effet joule.

Les usages les plus familiers de l'électricité nous montrent que le courant électrique chauffe les appareils ou conducteurs dans lesquels il passe; on donne le nom d'**effet joule** à ce phénomène.

Il y a *évidemment* effet joule chaque fois que l'on transforme l'énergie électrique en chaleur : radiateur, fer à repasser..., mais il y a *aussi* effet joule lorsque l'on veut en faire un autre usage, par exemple l'utilisation d'un moulin à café ou d'un aspirateur entraîne l'échauffement du moteur.

**Notons que l'effet joule n'est pas autre chose que l'énergie thermique prévue au principe de dégradation (§ 9, chap. 1).**

### 56. Expérience.

**1° Montage (fig. 46) et conditions de l'expérience.** — Nous nous proposons de mesurer le dégagement de chaleur (effet joule) produit par le passage d'un courant dans un fil métallique. Le seul effet existant dans ce cas étant l'effet thermique.

Plaçons l'élément chauffant (le fil) dans un calorimètre :

a) Le calorimètre étant thermiquement isolé la chaleur dégagée y restera à peu près totalement sans se dissiper à l'extérieur;

b) L'élément chauffant va céder au liquide la chaleur dégagée et, aux pertes calorifiques près, l'élévation de température du liquide sera **proportionnelle** à cette quantité de chaleur (voir Appendice II, p. 355).

**2° Première série de mesures.** — Réglons l'intensité du courant à une valeur donnée : 4 A, par exemple, et relevons la température toutes les 2 mn (tabl. A). Nous constatons que les élévations de tempé-



rature sont sensiblement proportionnelles aux durées de passage du courant.

*La quantité de chaleur dégagée par effet joule est proportionnelle à la durée de passage du courant.*

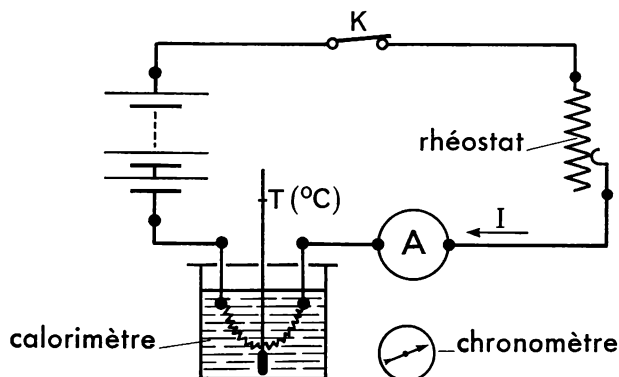


Fig. 46. — Le rhéostat permet le réglage du courant dans le circuit.

TABLEAU A

$I = 4 \text{ A}$      $T_0 = 19,2 \text{ }^\circ\text{C}$

| $t$ (mn)<br>Durée de passage<br>du courant | $T_1$ ( $^\circ\text{C}$ ) | $T_1 - T_0$ | $\frac{T_1 - T_0}{t}$        |
|--------------------------------------------|----------------------------|-------------|------------------------------|
| 2                                          | 24                         | 4,8         | $\frac{4,8}{2} = 2,4$        |
| 4                                          | 28,7                       | 9,5         | $\frac{9,5}{4} \approx 2,4$  |
| 6                                          | 33,3                       | 14,1        | $\frac{14,1}{6} \approx 2,4$ |

### 3<sup>o</sup> Deuxième série de mesures.

— Laissons passer pendant une même durée, soit 4 mn, un courant de 2 A, puis de 4 A, puis de 6 A. Les températures étant relevées au début et à la fin de chaque période (tabl. B). Nous constatons que les élévations de température sont sensiblement proportionnelles aux carrés des intensités.

symbole d'un rhéostat



Fig. 46 bis.

*La quantité de chaleur dégagée par effet joule est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

TABLEAU B

$t = 4 \text{ mn}$

| I (A) | $T_0$ | $T_1$ | $T_1 - T_0$ | $\frac{T_1 - T_0}{I^2}$      |
|-------|-------|-------|-------------|------------------------------|
| 2     | 17,3  | 19,7  | 2,4         | $\frac{2,4}{4} = 0,6$        |
| 4     | 19,2  | 28,7  | 9,5         | $\frac{9,5}{16} \simeq 0,6$  |
| 6     | 19,5  | 40,7  | 21,2        | $\frac{21,2}{36} \simeq 0,6$ |

**4° Troisième série de mesures.** — Remplaçons l'élément chauffant par un autre différent et recommençons la première série de mesures (tabl. C) nous constatons :

a) Que l'élévation de température est toujours proportionnelle à la durée de passage du courant;

b) Que les élévations de température, pour une même durée sont différentes de celles trouvées au 2°.

*La quantité de chaleur dégagée par effet joule dépend de l'élément chauffant utilisé.*

TABLEAU C

$I = 4 \text{ A} \quad T_0 = 18,7 \text{ }^\circ\text{C}$

| $t \text{ (mn)}$ | $T_1$ | $T_1 - T_0$ | $\frac{T_1 - T_0}{t}$      |
|------------------|-------|-------------|----------------------------|
| 2                | 21,1  | 2,4         | $\frac{2,4}{2} = 1,2$      |
| 4                | 23,4  | 4,7         | $\frac{4,7}{4} \simeq 1,2$ |
| 6                | 25,8  | 7,1         | $\frac{7,1}{6} \simeq 1,2$ |

### 57. Loi de Joule.

1° **Énergie électrique transformée en chaleur.** — Dans les expériences que nous venons de décrire l'énergie électrique n'est transformée qu'en une seule autre forme : la forme thermique. Nous pouvons donc écrire que l'énergie électrique fournie est égale à l'énergie thermique obtenue :

$$\begin{aligned}\text{énergie électrique} &= \text{énergie thermique} \\ W_{\text{el}} &= W_{\text{th}}\end{aligned}$$

Or nous savons calculer l'énergie thermique (Appendice II) :

$$W_{\text{th}} = mc (T_1 - T_0)$$

où, rappelons-le,  $m$  est la masse échauffée,  $c$  sa chaleur massique et  $(T_1 - T_0)$  l'élévation de température.

D'après les résultats de l'expérience, l'énergie thermique, donc l'énergie électrique :

- est proportionnelle à  $t$ ,
- est proportionnelle à  $I^2$ ,
- dépend du récepteur.

Une grandeur proportionnelle à plusieurs autres étant proportionnelle à leur produit, nous pouvons écrire :

$$W = RI^2t$$

où  $R$  est un facteur qui caractérise le récepteur et que nous appellerons sa **résistance électrique** ( $R$ ) ou plus simplement sa **résistance**.

2° **Énoncé de la loi.** — L'énergie électrique dissipée en chaleur par effet joule dans un récepteur est proportionnelle :

- à la résistance de ce récepteur;
- au carré de l'intensité du courant qui le traverse;
- à la durée de passage de ce courant.

### 58. Unité de résistance : l'ohm ( $\Omega$ ).

1° **Choix.** — Nous choisissons l'unité de résistance de façon que  $W = 1 \text{ J}$  quand  $I = 1 \text{ A}$  et  $t = 1 \text{ s}$ .

2° **DÉFINITION.** — L'ohm est la résistance d'un récepteur qui transforme en chaleur une énergie électrique de  $1 \text{ J}$  quand il est traversé pendant  $1 \text{ s}$  par un courant de  $1 \text{ A}$ .

## 59. Formules.

1<sup>o</sup> **Énergie :**

(11)

$$\boxed{W = RI^2t}$$

$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \\ t \text{ en secondes }^{(1)} \\ W \text{ en joules }^{(1)} \end{array} \right.$

2<sup>o</sup> **Puissance.** — Pour trouver la puissance dissipée par effet joule il suffit de diviser l'énergie par le temps :

$$P = \frac{W}{t} = \frac{RI^2t}{t} = RI^2$$

(12)

$$\boxed{P = RI^2}$$

$\left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \\ P \text{ en watts} \end{array} \right.$

3<sup>o</sup> **Chaleur.** — Rappelons que les quantités de chaleur doivent être exprimées en joules. Si toutefois on désire obtenir des calories il suffit de multiplier l'énergie trouvée par  $\frac{1}{4,18}$  soit environ 0,24.

## 60. Conditions d'application de la loi de Joule.

1<sup>o</sup> La loi de Joule a été établie à l'aide d'un récepteur qui ne donnait que de l'énergie thermique parce que le bilan énergétique était plus simple à effectuer mais... **la loi de Joule s'applique à tous les appareils électriques, générateurs et récepteurs.**

Il en est évidemment de même des deux formules 11 et 12 qui traduisent cette loi.

2<sup>o</sup> **Remarques.** — a) La formule  $P = RI^2$  donne donc la puissance électrique transformée en **chaleur** par n'importe quel appareil mais **non** la *puissance totale* absorbée ou fournie par cet appareil.

b) Pour connaître la puissance **totale** c'est la formule  $P = UI$  qu'il faut utiliser.

(1) Si l'on exprime t en heures on trouvera W en watts-heures.

c) Dans le cas d'un récepteur purement thermique et seulement dans ce cas  $P = RI^2$  et  $P = UI$  donnent le **même résultat** puisque toute la puissance fournie est alors transformée en chaleur.

3° La formule  $P = RI^2$  peut s'écrire :

$$R = \frac{P}{I^2} \quad P = RI^2 \quad I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

8. 01. — Un courant de 2,5 A traverse pendant 20 mn un conducteur dont la résistance est 48 Ω. Calculer la puissance et l'énergie dissipées par effet joule.

— SOLUTION —

Puissance :

$$P = RI^2 = 48 \times (2,5)^2 = 300 \text{ W}$$

Énergie :

$$W = RI^2 t = 48 \times (2,5)^2 \times 1\,200 = 360\,000 \text{ J}$$

*Remarque.* — On peut aussi effectuer directement le produit de P par t.

8. 02. — Une cafetière électrique a une puissance de 700 W. Sa contenance est de 1 litre. Calculer le temps nécessaire à l'ébullition de 1 litre d'eau pris à la température de 15°C. On rappelle que la chaleur massique de l'eau est  $c = 4\,180 \text{ J/}^\circ\text{C.kg}$ .

— SOLUTION —

Quantité de chaleur à fournir : masse d'eau 1 kg :

$$W = mc(T_1 - T_0) = 1 \times 4\,180 \times (100 - 15) = 355\,000 \text{ J}$$

Durée du chauffage :

$$t = \frac{W}{P} = \frac{355\,000}{700} = 507 \text{ s}$$

8. 03. — Un moteur dont la puissance utile est 7,5 ch absorbe 30 A sous une différence de potentiel de 220 V. En admettant que toute l'énergie perdue l'est par effet joule, calculer la résistance du moteur.

## — SOLUTION —

Puissance absorbée :  $P_a = UI = 220 \times 30 = 6\,600 \text{ W}$

Puissance utile :  $P_u = 736 \times 7,5 = 5\,520 \text{ W}$

Puissance perdue :  $P_p = 6\,600 - 5\,520 = 1\,080 \text{ W}$

Résistance :  $R = \frac{P_p}{I^2} = \frac{1\,080}{900} = 1,2 \, \Omega$

II. AVEC RÉPONSES.

**8. 04.** — Un moteur absorbe un courant de 80 A sous une différence de potentiel de 550 V; sa résistance est de 0,5  $\Omega$ . En admettant que les seules pertes soient les pertes joules.

Calculer : 1° La puissance absorbée; — 2° La puissance perdue par effet joule; — 3° La puissance utile et le rendement.

Réponses :  $P_a = 44\,000 \text{ W}$ ;  $P_p = 3\,200 \text{ W}$ ;  $P_u = 40\,800 \text{ W}$ ;  $\eta = 92,7 \%$ .

**8. 05.** — Une cuisinière électrique a deux allures de chauffe : un élément chauffant de 700 W et un autre de 1 200 W.

1° Sachant que la tension de fonctionnement est 125 V, calculer la résistance de chaque élément.

2° Calculer la durée nécessaire à l'ébullition de 3 litres d'eau prise à 20 °C quand on utilise l'élément le plus puissant.

Réponses :  $R_1 = 22,3 \, \Omega$ ;  $R_2 = 13 \, \Omega$ ;  $t = 836 \text{ s}$ .

III. A RÉSOUDRE.

**8. 06.** — Un générateur a une résistance de 0,01  $\Omega$  et débite un courant de 2 000 A. Calculer la puissance dissipée par effet joule et, en thermies, l'énergie calorifique correspondant à 24 h de fonctionnement.

**8. 07.** — Un moteur absorbe un courant de 8 A sous une différence de potentiel de 240 V. Son rendement est de 82 %.

Calculer : 1° Sa puissance utile; — 2° La puissance perdue; — 3° La résistance du moteur, toute la puissance perdue étant due à l'effet joule.

**8. 08.** — On se propose de fabriquer une bouilloire capable de porter à ébullition en 15 mn 1 litre d'eau prise à 10 °C. Quels seront le courant absorbé et la résistance de l'élément chauffant :

1° Si la différence de potentiel de fonctionnement est de 110 V?

2° Si la différence de potentiel de fonctionnement est de 220 V?

**8. 09. —** Un radiateur fonctionne sous une différence de potentiel de 220 V et consomme un courant de 12 A.

Calculer : 1° Sa puissance; — 2° Sa résistance; — 3° L'énergie thermique qu'il fournit en 24 h.

**8. 10. —** Calculer la résistance d'un fer à repasser de 550 W prévu pour fonctionner sous une différence de potentiel de 220 V.

---

## LOI D'OHM

### 61. Puissance totale et puissance thermique.

1° **Formules.** — Considérons un récepteur, deux formules permettent un calcul de puissance :

a)  $P_a = UI$ , cette formule donne la puissance **absorbée** par un récepteur **quel que soit** ce récepteur.

b)  $P_t = RI^2$ , cette formule donne la puissance transformée sous la forme **thermique** par un récepteur **quel que soit** ce récepteur.

2° **Comparaison.** — Comparons ces deux puissances :

CAS A. — *Peut-on avoir  $P_t > P_a$ ?* **Non, c'est impossible**, cela signifierait que le récepteur transforme en chaleur plus de puissance (et par suite d'énergie) qu'il n'en reçoit.

CAS B. — *Peut-on avoir  $P_t = P_a$ ?* **Oui**, s'il s'agit d'un récepteur qui transforme en chaleur toute la puissance reçue. Nous dirons que c'est un **récepteur purement thermique**.



Fig. 47. — Symboles d'une résistance.

On le désigne souvent par l'une des expressions « *résistance morte* », « *résistance pure* » ou simplement *résistance* ; nous emploierons ce dernier mot quand aucune confusion ne sera possible avec la grandeur électrique correspondante (fig. 47).

Remplaçons les puissances par leurs expressions et simplifions par  $I$  :

$$\begin{aligned} P_t &= P_a \\ RI^2 &= UI \\ RI &= U \end{aligned}$$

Ce cas B est un cas particulier concernant quelques usages de l'électricité (chauffage, éclairage par incandescence...).



**CAS C.** — *Peut-on avoir  $P_t < P_a$ ? Évidemment, c'est même le cas le plus fréquent, le plus général, celui où une partie seulement de l'énergie électrique devient chaleur. L'autre partie, la plus importante, devient énergie mécanique ou chimique (ou autre).*

Ce cas concerne les applications les plus importantes de l'électricité : moteur, électrolyse, etc.

Remplaçons les puissances par leurs expressions et simplifions par  $I$  :

$$\begin{aligned} P_t &< P_a \\ RI^2 &< UI \\ RI &< U \end{aligned}$$

## 62. Loi d'Ohm.

**1° Énoncé.** — La différence de potentiel entre les bornes d'un récepteur purement thermique est égale au produit de la résistance de ce récepteur par l'intensité du courant qui le traverse.

**2° Formule.** — Nous l'avons établie au paragraphe précédent :

$$(13) \quad \boxed{U = RI} \quad \left\{ \begin{array}{l} R \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \\ U \text{ en volts} \end{array} \right.$$

**3° Conditions d'application de la loi.** — a) Pour établir la loi nous avons supposé que le récepteur était purement thermique (cas B).

b) Il faut bien comprendre qu'écrire  $U = RI$  ou écrire que toute l'énergie est transformée en chaleur c'est la même chose.

c) Appliquer la loi à un moteur ou à un accumulateur n'a aucun sens.

**4° Remarque importante.** — Dans le cas d'un moteur ou d'un accumulateur le produit  $RI$  donne la « chute de tension » c'est-à-dire le nombre de volts perdus à cause de la résistance, ces volts ne représentent, heureusement, qu'une faible part de la différence de potentiel  $U$ .

**5° Nouvelle définition de l'ohm.** — L'ohm est la résistance d'un récepteur purement thermique qui est traversé par un courant de 1 A quand on lui applique une différence de potentiel de 1 V.

### 63. Vérification expérimentale de la loi.

Effectuons le montage de la figure 48 dans lequel le rhéostat permet de faire varier le courant.

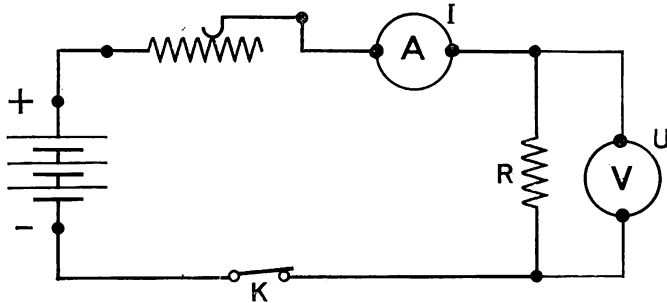


Fig. 48. — Vérification expérimentale de la loi d'Ohm.

Relevons  $I$  et  $U$  pour différentes positions du curseur du rhéostat. Nous constatons (voir tableau ci-dessous) que  $U$  et  $I$  sont sensiblement proportionnels :

$$\frac{U}{I} = \text{constante} = R$$

TABLEAU

| $U$ (v) | $I$ (A) | $\frac{U}{I} = R$ ( $\Omega$ ) |
|---------|---------|--------------------------------|
| 2,3     | 1,14    | $\frac{2,3}{1,14} \simeq 2$    |
| 3,7     | 1,85    | $\frac{3,7}{1,85} = 2$         |
| 4,8     | 2,41    | $\frac{4,8}{2,41} \simeq 2$    |

### 64. Autres formules.

1° La loi d'Ohm peut s'écrire indifféremment :

$$U = RI \quad I = \frac{U}{R} \quad R = \frac{U}{I}$$

les unités étant celles de la formule 13.

**2° Nouvelle formule.** — Éliminons  $I$  (au lieu de  $P$ ) entre les deux formules :

$$P = UI \quad \text{et} \quad P = RI^2$$

de la première nous tirons  $I = \frac{P}{U}$  que nous portons dans la deuxième :

$$P = R \left( \frac{P}{U} \right)^2 = \frac{RP^2}{U^2} \quad \text{d'où} \quad 1 = \frac{RP}{U^2}$$

enfin :

$$U^2 = PR \quad \left\{ \begin{array}{l} P \text{ en watts} \\ R \text{ en ohms} \\ U \text{ en volts} \end{array} \right.$$

Cette formule étant établie dans les mêmes conditions que  $U = RI$ , en supposant que toute l'énergie fournie est transformée en chaleur, est soumise à la même restriction : elle ne s'applique qu'aux **récepteurs purement thermiques**.

## 65. Mesure d'une résistance.

**1° Méthode voltampèremétrique.** — La formule  $R = \frac{U}{I}$  suggère une méthode de mesure de résistance.

En fait on se rend vite compte que les mesures correctes et simultanées de  $U$  et de  $I$  sont impossibles, d'où l'existence de deux montages.

a) *Montage 1* (fig. 49). — La tension mesurée est « *correcte* », mais le courant indiqué par l'ampèremètre est celui qui traverse  $R$  augmenté du courant  $i$ , faible mais non nul, qui passe dans le voltmètre. La mesure donnera donc une *valeur trop faible* pour la résistance puisque l'on trouve :

$$R' = \frac{U}{I'}$$

avec un dénominateur trop grand.

b) *Montage 2* (fig. 50). — Le courant est bien le même dans l'ampèremètre et dans la résistance mais la tension indiquée est celle de la résistance augmentée de la tension  $u$ , faible mais non nulle, qui existe entre les bornes de l'ampèremètre.

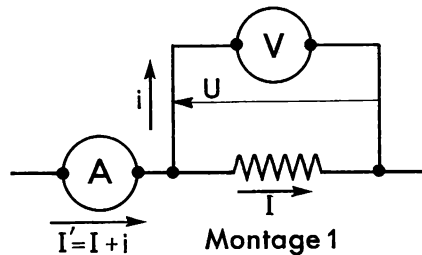
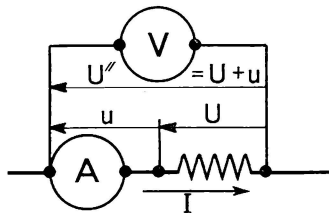


Fig. 49.



Montage 2

Fig. 50.

c) *Remarque.* — Si l'on connaît la résistance des appareils (voltmètre et ampèremètre) on peut rectifier la valeur trouvée et connaître  $R$  (problèmes 9.03 et 9.10).

**2° Ohmmètre.** — C'est un appareil qui effectue la mesure directe des résistances mais avec une médiocre précision. Il est surtout utilisé pour connaître un ordre de grandeur et pour les très grandes résistances (mégohmmètre fig. 51).

### 66. Chute de tension dans une ligne de transport.

1° Chacun des deux fils de la ligne a une résistance propre soit  $r$ , quand le courant  $I$  les traverse il y a entre les extrémités de chaque fil une différence de potentiel :

$$u = rI$$

cette différence de potentiel est appelée chute de tension dans le fil.

Les deux fils étant en série avec l'utilisation, les deux chutes de tension s'ajoutent à la tension disponible à l'arrivée pour donner une tension plus élevée au départ. Il faut donc prévoir au départ des lignes une différence de potentiel supérieure à celle que l'on désire obtenir à l'arrivée.

La mesure donnera donc une valeur trop élevée pour la résistance puisque l'on trouve :

$$R'' = \frac{U''}{I}$$

avec un numérateur trop grand.



Photo Chauvin Arnoux.

Fig. 51. — Mégohmmètre.

EXEMPLE (fig. 52). — On veut avoir 110 V entre B et D pour un courant de 100 A et deux fils ayant chacun  $0,05 \Omega$  de résistance.

Chute de tension en ligne :

$$2u = 2rI = 2 \times 0,05 \times 100 = 10 \text{ V}$$

Tension au départ entre A et C :

$$U = U' + 2rI = 110 + 10 = 120 \text{ V}$$

**2° Transport en haute tension.** — Pour réduire la chute de tension en ligne, et en même temps les pertes par effet joule, il faut avec une ligne de résistance donnée avoir un courant le plus faible possible.

Pour avoir la même puissance disponible à l'arrivée, la diminution de  $I$  doit être compensée par une augmentation de  $U$  puisque  $P = UI$ .

C'est la raison pour laquelle le transport à longue distance de l'énergie électrique se fait sous tension très élevée (220 ou 380 kV).

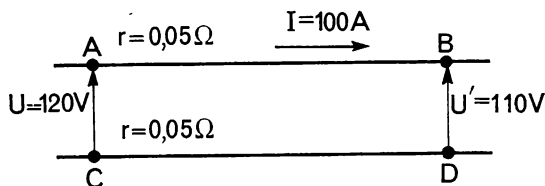


Fig. 52.

REMARQUE. — La diminution de  $I$ , diminue non seulement la chute de tension  $rI$  dans un fil mais aussi les pertes joules  $rI^2$  (problème 9.09).

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

9. 01. — Un radiateur électrique porte les indications 220 V, 2 750 W. Calculer sa résistance.

— PREMIÈRE SOLUTION —

$$\text{Intensité du courant : } I = \frac{P}{U} = \frac{2\,750}{220} = 12,5 \text{ A}$$

$$\text{Résistance : } R = \frac{U}{I} = \frac{220}{12,5} = 17,6 \Omega$$

## — DEUXIÈME SOLUTION —

$$\text{Résistance : } R = \frac{U^2}{P} = \frac{220 \cdot 220}{2\,750} = 17,6 \, \Omega$$

**9. 02. —** Un moteur fonctionnant sous une différence de potentiel de 120 V, absorbe un courant de 15 A. Sa résistance électrique est  $R = 1,2 \, \Omega$ . Calculer :

1<sup>o</sup> La puissance absorbée; — 2<sup>o</sup> La puissance perdue par effet joule; — 3<sup>o</sup> La chute de tension; — 4<sup>o</sup> Le rendement en supposant que les seules pertes sont les pertes joules.

## — SOLUTION —

$$1^{\circ} \text{ Puissance absorbée : } P_a = UI = 120 \cdot 15 = 1\,800 \text{ W}$$

2<sup>o</sup> Puissance perdue (thermique) :

$$P_t = RI^2 = 1,2 \cdot 15^2 = 270 \text{ W}$$

$$3^{\circ} \text{ Chute de tension : } u = RI = 1,2 \cdot 15 = 18 \text{ V}$$

4<sup>o</sup> Puissance utile :

$$P_u = UI - RI^2 = 1\,800 - 270 = 1\,530 \text{ W}$$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{1\,530}{1\,800} = \frac{P_u}{P_a} = 0,85 = 85 \%$$

**9. 03. —** On effectue la mesure d'une résistance  $R$  par la méthode volt-ampère-métrique. On connaît la résistance du voltmètre  $v = 1\,000 \, \Omega$  mais on ignore la résistance  $a$  de l'ampèremètre.

Dans le montage 1 (fig. 53) on a relevé les indications suivantes :

$$U_1 = 20 \text{ V; } I_1 = 4,02 \text{ A}$$

Dans le montage 2 (fig. 54) on a relevé :

$$U_2 = 10,2 \text{ V; } I_2 = 2 \text{ A}$$

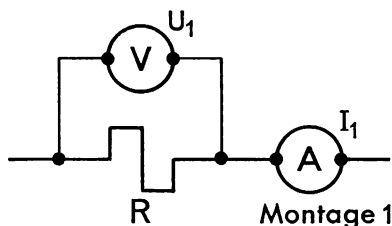


Fig. 53.

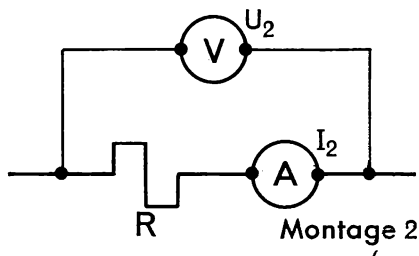


Fig. 54.

Déterminer R et  $\alpha$ .

— SOLUTION —

Montage 1 :

Le voltmètre indique 20 V, c'est la différence de potentiel à laquelle il est soumis. Sa résistance étant de 1 000  $\Omega$  il est traversé par un courant :

$$i = \frac{U_1}{v} = \frac{20}{1\,000} = 0,02 \text{ A}$$

courant réel à travers la résistance R :

$$I = I_1 - i = 4,02 - 0,02 = 4 \text{ A}$$

Valeur de R :

$$R = \frac{U_1}{I} = \frac{20}{4} = 5 \text{ } \Omega$$

Montage 2 :

Le courant dans R est de 2 A, la différence de potentiel réelle de la résistance est :

$$U = RI_2 = 5 \times 2 = 10 \text{ V}$$

Chute de tension dans l'ampèremètre :

$$u = U_2 - U = 10,2 - 10 = 0,2 \text{ V}$$

L'ampèremètre étant traversé par 2 A sa résistance est :

$$\alpha = \frac{u}{I_2} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ } \Omega$$

## II. AVEC RÉPONSES.

9. 04. — Au départ d'une ligne la tension est  $U = 230 \text{ V}$ , à l'arrivée la tension est 215 V. Sachant que le courant dans la ligne est de 20 A, calculer :

1° La chute de tension en ligne; — 2° Les pertes joules dans la ligne.

Réponses : 15 V ; 300 W.

9. 05. — Un moteur absorbe un courant de 8 A sous une différence de potentiel de 220 V. Les pertes joules sont égales à 128 W. Calculer :

1° La résistance du moteur;

2° La chute de tension;

3° La puissance absorbée et la puissance utile.

Réponses :  $R = 2 \text{ } \Omega$ ;  $u = 16 \text{ V}$ ;  $P_a = 1\,760 \text{ W}$ ;  $P_u = 1\,632 \text{ W}$ .

## III. A RÉSOUDRE.

9. 06. — Calculer la résistance des lampes portant les indications suivantes : 120 V, 60 W; 120 V, 100 W; 220 V, 40 W; 220 V, 150 W

9. 07. — Un fer à repasser porte les indications 240 V, 600 W :

1° Calculer sa résistance;

2° En admettant que cette résistance soit inchangée calculer la puissance qu'il consomme sous 120 V.

9. 08. — Une cuve d'électrolyse fonctionne sous 1,7 V. Les pertes joules sont de 10 W quand le courant est de 50 A. Calculer la résistance de la cuve et la chute de tension correspondante.

9. 09. — Une ligne de transport d'énergie a une résistance totale de 0,5  $\Omega$ . On veut lui faire transporter une puissance de 1 000 kW, puissance mesurée au départ. Calculer lorsque la tension au départ est de 1 000 V puis de 5 000 V :

1° Le courant dans la ligne;

2° La chute de tension en volt puis en % de la tension au départ;

3° Les pertes joules en watts puis en % de la puissance au départ;

4° La tension et la puissance disponibles à l'arrivée.

9. 10. — On effectue la mesure d'une résistance R par la méthode voltampèremétrique à l'aide d'un voltmètre de résistance  $v = 500 \Omega$  et d'un ampèremètre de résistance  $\sigma = 0,2 \Omega$ .

1° Avec le montage 2 (voir Problème 9. 03) on lit :

$$U_2 = 35,4 \text{ V} \quad I_2 = 3 \text{ A}$$

Calculer la valeur de R.

2° Quelle est l'indication  $I_1$  de l'ampèremètre avec le montage 1 si le voltmètre indique 29 V?

---



## RÉSISTIVITÉ

### 67. Expériences, résistance d'un fil conducteur.

**1° Influence de la longueur du fil.** — Coupons des morceaux de 1 m, 2 m et 3 m d'un fil conducteur et montons-les en série.

Ces morceaux sont donc de même nature et de même section.

Réglons l'intensité du courant à une valeur quelconque soit 1 A.

Mesurons (fig. 55) les différences de potentiel entre les bornes de chaque morceau, nous trouvons :

$$1,5 \text{ V}; \quad 3 \text{ V}; \quad 4,5 \text{ V}$$

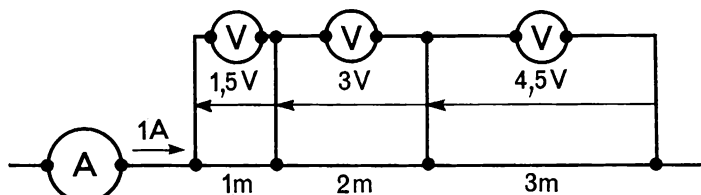


Fig. 55.

Le courant commun étant de 1 A les résistances sont donc respectivement :

$$1,5 \, \Omega; \quad 3 \, \Omega; \quad 4,5 \, \Omega$$

→ Nous constatons que ces résistances sont proportionnelles *aux longueurs* de fil.

**2° Influence de la section du fil.** — Coupons maintenant six morceaux de 1 m du même fil et disposons-les de la façon suivante :

Montons en série un morceau seul, puis deux morceaux en parallèle, puis trois morceaux en parallèle

(fig. 56).

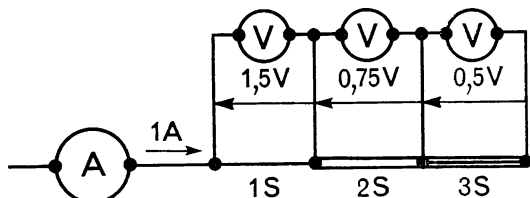


Fig. 56.

Nous obtenons ainsi des conducteurs de même longueur et de même nature mais dont les sections sont respectivement 1 fois, 2 fois et 3 fois la section  $S$  du fil primitif.

Réglons à nouveau le courant à 1 A et mesurons les différences de potentiel, nous trouvons :

$$1,5 \text{ V}; \quad 0,75 \text{ V}; \quad 0,5 \text{ V}$$

Par conséquent les résistances sont :

$$1,5 \, \Omega; \quad 0,75 \, \Omega; \quad 0,5 \, \Omega$$

La résistance du fil de section simple étant  $1,5 \, \Omega$  nous voyons que celle du fil de section double en est la moitié et que celle du fil de section triple en est le tiers.

→ La résistance d'un fil est inversement proportionnelle à sa section.

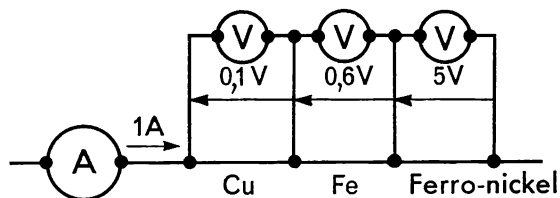


Fig. 57.

**3<sup>o</sup> Influence de la nature du conducteur.** — Montons en

série (fig. 57) des fils de même section et de même longueur mais de nature différente :

Cuivre, Fer, Ferro-nickel

Nous trouvons que la résistance du fer est 6 fois celle du cuivre et la résistance du ferro-nickel 50 fois.

→ La résistance d'un conducteur dépend donc de sa nature.

## 68. Expression de la résistance.

**1<sup>o</sup> Règle.** — La résistance d'un conducteur filiforme et homogène :

- est proportionnelle à sa longueur;
- est inversement proportionnelle à sa section;
- dépend d'un facteur qui caractérise sa nature et que nous appellerons sa résistivité ( $\rho$ ).

2° Formule :

$$(14) \quad \boxed{R = \frac{\rho l}{S}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l \text{ en mètres} \\ S \text{ en m}^2 \\ \rho \text{ voir § 69, 1}^\circ \\ R \text{ en ohms} \end{array} \right.$$

### 69. Unités de résistivité.

1° **Choix.** — Nous devons la choisir telle que, la longueur étant exprimée en mètres et la section en mètres carrés, nous trouvions la résistance en ohms.

Tirons  $\rho$  de la formule 14 :

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

et remplaçons les grandeurs par leurs unités :

$$\rho \rightarrow \frac{\text{ohms} \times \text{mètres carrés}}{\text{mètres}} = \frac{\Omega \text{m}^2}{\text{m}}$$

soit en simplifiant  $\Omega \text{m}$ .

La résistivité s'exprime en ohms-mètres.

2° **Autres unités.**

a) *Multiple* : Le mégohm-mètre ( $\text{M}\Omega\text{m}$ ) :  $1 \text{ M}\Omega\text{m} = 10^6 \Omega\text{m}$

b) *Sous-multiple* : Le microhm-mètre ( $\mu\Omega\text{m}$ ) :  $1 \mu\Omega\text{m} = 10^{-6} \Omega\text{m}$

c) *Ancienne unité* : On trouve encore des tables où la résistivité est exprimée en ohm-centimètres ( $\Omega\text{cm}$ ). Il suffit de savoir que le nombre correspondant doit être multiplié par  $\frac{1}{100}$  soit  $10^{-2}$  pour avoir des ohm-mètres :

EXEMPLE : si on lit  $\rho = 3 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$   
on a  $\rho = 3 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

3° **Résistivité de quelques substances.** — Voir tableau en fin de chapitre (p. 86).

**4° Remarques.** — a) Si  $l = 1 \text{ m}$  et  $S = 1 \text{ m}^2$  la formule 14 donne :

$R = \rho$  ou plus exactement  $R$  et  $\rho$  sont mesurées par le même nombre (fig. 58) d'où :

La résistivité d'une substance a même mesure que la résistance d'un échantillon de cette substance ayant pour longueur l'unité de longueur (1 m) et pour section l'unité de section (1 m<sup>2</sup>).

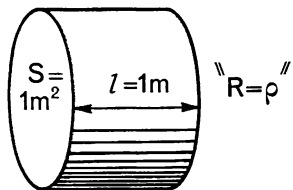


Fig. 58.

b) *Calculs avec la formule 14.* — Cette formule s'écrit selon les besoins :

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad S = \frac{\rho l}{R} \quad \rho = \frac{RS}{l} \quad l = \frac{RS}{\rho}$$

Il faut faire très attention au nombre de zéros dans les différentes grandeurs; il est indispensable d'effectuer les calculs à l'aide des puissances de 10.

EXEMPLE : Calculer  $R$  avec :

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m} \quad S = 1 \text{ mm}^2 \quad l = 1 \text{ km}$$

il faut d'abord convertir les unités :

$$S = 10^{-6} \text{ m}^2 \quad l = 10^3 \text{ m}$$

d'où :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \times 10^3}{10^{-6}} = 17 \Omega.$$

## 70. Variations de la résistivité.

**1° La résistivité d'un matériau peut varier avec** la température, l'éclairement, le sens du courant, la tension appliquée, etc.

Nous nous bornerons dans ce chapitre à étudier l'influence de la température.

**2° Influence de la température.** — a) *Expérience.* — Plongeons dans un récipient d'eau un fil conducteur parcouru par un courant et chauffons (fig. 59). Au fur et à mesure que l'eau s'échauffe on constate que le courant  $I$  diminue bien que la tension  $U$  soit constante : c'est parce que la résistance du fil augmente. Or les dimensions  $l$  et  $S$  du fil n'ayant pas varié c'est que la résistivité s'est accrue.

b) *Relation.* — En première approximation les variations de résistivité peuvent être considérées comme proportionnelles aux variations de température; elles dépendent aussi de la résistivité à 0°C et de la nature du conducteur <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> :

$$\Delta \rho = \rho_0 \alpha \Delta t$$

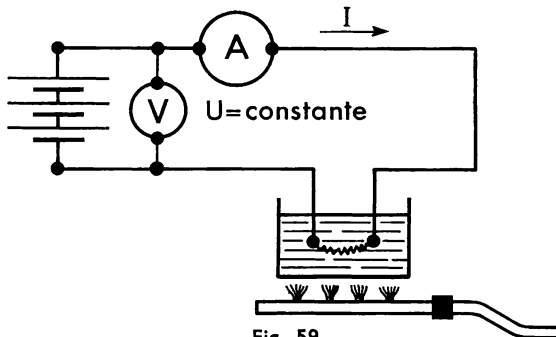


Fig. 59.

$\alpha$  est un coefficient dit de température qui dépend de la nature du conducteur (voir tableau).

La température initiale à considérer étant 0°C on a :

$$\Delta t = t - 0 = t$$

La résistivité à  $t$  degrés est :

$$\begin{aligned} \rho_t &= \rho_0 + \Delta \rho \\ &= \rho_0 + \rho_0 \alpha t \\ &= \rho_0 (1 + \alpha t) \end{aligned}$$

(15)

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

La résistivité est donc une *fonction linéaire* de la température.

c) *Résistance.* — Pour calculer la résistance on multiplie la résistivité par le rapport  $\frac{l}{S}$  qui est constant si on néglige la dilatation du fil, on a donc entre les résistances à 0 et à  $t$  degrés une relation analogue à la formule 15.

(15 bis)

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

(1) La lettre grecque  $\Delta$  placée devant une grandeur signifie : « variation de ». Ainsi  $\Delta \rho$  forme un tout indissociable qui veut dire « variation de résistivité ».

(2)  $\rho_0$  veut dire résistivité à 0°C.

| NOMS DES SUBSTANCES                     | RÉSISTIVITÉ<br>(1)  | COEFFICIENT<br><i>a</i>  |
|-----------------------------------------|---------------------|--------------------------|
| <b>MÉTAUX</b>                           |                     |                          |
| Argent . . . . .                        | $1,5 \cdot 10^{-8}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$      |
| Cuivre . . . . .                        | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-3}$        |
| Aluminium . . . . .                     | $2,6 \cdot 10^{-8}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$      |
| Tungstène. . . . .                      | $5 \cdot 10^{-8}$   | $5 \cdot 10^{-3}$        |
| Fer. . . . .                            | $8,5 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-3}$        |
| <b>ALLIAGES</b>                         |                     |                          |
| Laiton (Cu 60 %; Zn 40 %). . . . .      | $7,5 \cdot 10^{-8}$ | $1,5 \cdot 10^{-3}$      |
| Maillechort (Cu 60 %; Zn 25 %; Ni 15 %) | $34 \cdot 10^{-8}$  | $0,25 \cdot 10^{-3}$     |
| Manganine (Cu 84 %; Mn 12 %; Ni 4 %).   | $42 \cdot 10^{-8}$  | $0,02 \cdot 10^{-3}$     |
| Constantan (Cu 60 %; Ni 40 %). . . .    | $49 \cdot 10^{-8}$  | $0,01 \cdot 10^{-3}$ (2) |
| Ferro-nickel (Fe 75 %; Ni 25 %). . . .  | $80 \cdot 10^{-8}$  | $0,9 \cdot 10^{-3}$      |

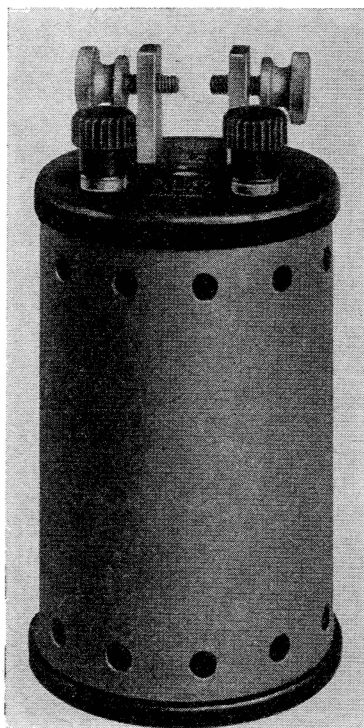


Photo AOIP.  
Fig. 60. — Résistance étalon  
de  $0,1 \Omega$

## 71. Conséquences.

**1° Lampes d'éclairage.** — Leur température de fonctionnement étant de  $2\,600^{\circ}\text{C}$  elles ont alors une résistance égale à 10 fois leur résistance à froid. Si une lampe consomme 1 A à chaud elle consomme donc à froid 10 A pendant un temps très court.

**2° Résistances étalon** (fig. 60). — Elles ne doivent pas varier pendant les mesures d'où leur fabrication en constantan (voir tableau ci-dessus), et la nécessité malgré cela de ne pas les laisser en circuit trop longtemps. Elles sont, en outre, prévues pour un courant maximal à ne pas dépasser.

(1) La résistivité est donnée à  $0^{\circ}\text{C}$ .

(2) On remarque le faible coefficient de température du constantan d'où son nom.

**3° Mesure des températures.** — Il est impossible de mesurer directement la température des enroulements d'une machine mais grâce à la variation de résistance cette température peut être calculée (Problème 10. 05).

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

**10. 01.** — Un radiateur électrique porte les indications 220 V, 1 500 W. L'élément chauffant a une section de 0,8 mm<sup>2</sup> et une longueur de 2 m :

1° Calculer la résistance du radiateur;

2° Calculer la résistivité de l'élément.

— SOLUTION —

$$1^{\circ} \text{ Résistance : } R = \frac{U^2}{P} = \frac{220 \times 220}{1\,500} = 32,3 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} 2^{\circ} \text{ Résistivité : } S &= 0,8 \text{ mm}^2 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \\ \rho &= \frac{RS}{l} = \frac{32,3 \times 0,8 \cdot 10^{-6}}{2} = 12,9 \cdot 10^{-8} \, \Omega\text{m} \\ &= 1\,290 \cdot 10^{-8} \, \Omega\text{m} \end{aligned}$$

**10. 02.** — La résistance d'un rhéostat est de 620  $\Omega$  à 0°C. Calculer sa résistance à 50°C. On rappelle que  $\alpha = 0,004$ .

— SOLUTION —

$$\begin{aligned} \text{Résistance à } 50^{\circ}\text{C : } R_{50} &= R_0 (1 + \alpha t) \\ &= 620 (1 + 0,004 \times 50) \\ &= 620 \times 1,2 = 744 \, \Omega \end{aligned}$$

**10. 03.** — La résistance d'un moteur est 0,636  $\Omega$  à 15°C. Quelle est sa résistance à 90°C? ( $\alpha = 0,004$ ).

— PREMIÈRE SOLUTION —

Calcul de R à 0°C :

$$R_0 = \frac{R_{15}}{1 + \alpha t} = \frac{0,636}{1 + 0,004 \times 15} = 0,6$$

$$\begin{aligned} \text{Résistance à } 90^{\circ}\text{C : } R_{90} &= R_0 (1 + \alpha t) \\ &= 0,6 (1 + 0,004 \times 90) \\ &= 0,6 \times 1,36 = 0,816 \, \Omega \end{aligned}$$

## — DEUXIÈME SOLUTION —

On élimine  $R_0$  entre les deux formules suivantes :

$$\text{à } 15^\circ\text{C} : R_{15} = R_0 (1 + 15 a)$$

$$\text{à } 90^\circ\text{C} : R_{90} = R_0 (1 + 90 a)$$

$$\frac{R_{90}}{R_{15}} = \frac{1 + 90a}{1 + 15a}$$

$$\frac{R_{90}}{0,636} = \frac{1,36}{1,06}$$

$$\text{d'où : } R_{90} = 0,636 \times \frac{1,36}{1,06} = 0,816 \, \Omega$$

II. AVEC RÉPONSES.

**10. 04.** — La résistance d'un appareil est  $16,14 \, \Omega$  à  $20^\circ\text{C}$  et  $20,7 \, \Omega$  à  $100^\circ\text{C}$ . Calculer le coefficient de température  $a$  du métal.

Réponse :  $a = 0,0038$ .

**10. 05.** — L'enroulement d'une machine a une résistance de  $0,424 \, \Omega$  à  $15^\circ\text{C}$ . Après 2 h de fonctionnement la résistance est de  $0,520 \, \Omega$ . Quelle est alors la température de l'enroulement si  $a = 0,004$ ?

Réponse :  $75^\circ\text{C}$ .

III. A RÉSOUDRE.

**10. 06.** — On donne 3 paramètres d'une résistance. Calculer le quatrième à l'aide de la formule  $R = \frac{\rho l}{S}$  :

|                               |                        |                         |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| a) $\rho = 3 \cdot 10^{-8}$   | $l = 1 \, \text{km}$   | $S = 12 \, \text{mm}^2$ |
| b) $\rho = 8 \cdot 10^{-8}$   | $l = 0,4 \, \text{m}$  | $R = 1 \, \Omega$       |
| c) $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ | $S = 1 \, \text{cm}^2$ | $R = 0,3 \, \Omega$     |
| d) $S = 1,7 \, \text{mm}^2$   | $l = 1 \, \text{km}$   | $R = 10 \, \Omega$      |

**10. 07.** — La résistance à  $20^\circ\text{C}$  d'un générateur est  $0,486 \, \Omega$ . Calculer sa résistance à  $120^\circ\text{C}$  ( $a = 0,004$ ).

**10. 08.** — Lorsque l'on applique  $120 \, \text{V}$  à  $0^\circ\text{C}$  entre les bornes d'un rhéostat le courant est de  $2,48 \, \text{A}$ . A  $60^\circ\text{C}$  le courant n'est plus que de  $2 \, \text{A}$  pour la même tension. Calculer le coefficient  $a$  du métal.



**10. 09. —** Un rhéostat de  $120\ \Omega$  est prévu pour un courant de  $2\text{ A}$ . Le fil qui le constitue a une longueur de  $30\text{ m}$  et un diamètre de  $1\text{ mm}$ . Calculer :

- 1° La tension maximale que l'on peut appliquer au rhéostat;
- 2° La puissance qui est alors dissipée;
- 3° La résistivité du fil.

**10. 10. —** Une ligne bifilaire a une longueur de  $100\text{ m}$  et une section de  $15\text{ mm}^2$ . La tension au départ de la ligne est de  $240\text{ V}$ . Le courant est de  $40\text{ A}$ . La résistivité de la ligne est  $1,7 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ . Calculer :

- 1° La résistance de la ligne;
  - 2° La chute de tension en ligne;
  - 3° Les pertes joules;
  - 4° La tension à l'arrivée.
-

## CONSÉQUENCES DE L'EFFET JOULE

### 72. Température d'équilibre d'un conducteur.

**1° Constatations.** — Utilisons un radiateur électrique dont l'élément chauffant est visible.

Avant le branchement l'élément est froid ou plus exactement à la température de la salle où il se trouve.

Branchons le radiateur sur une prise de courant : l'élément s'échauffe progressivement jusqu'à une température de 900 °C environ (rouge cerise).

Désormais la température restera inchangée tant que l'appareil sera en fonctionnement. On dit qu'il a atteint sa **température d'équilibre**.

Si, ensuite, on débranche l'appareil on le verra refroidir, au moins au début, grâce au changement de coloration de l'élément chauffant.

**2° Échanges de chaleur.** — Lorsqu'un corps chaud est placé dans un milieu froid il tend à se refroidir en cédant sa chaleur au milieu qui, lui, tend à s'échauffer. Si le corps continue à recevoir de la chaleur d'une source il se maintiendra à une certaine température malgré la chaleur qu'il cède au milieu.

C'est le cas des appareils électriques en fonctionnement.

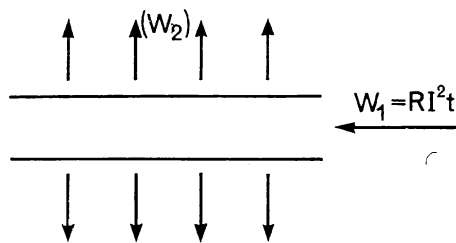


Fig. 61. — Le conducteur reçoit  $W_1$  et cède  $W_2$ .

**3° Bilan thermique.** — Soit  $W_1$  l'énergie thermique reçue par un appareil électrique sous forme d'effet joule :  $W_1 = RI^2t$ , et soit  $W_2$  l'énergie qu'il cède au milieu ambiant par rayonnement, convection... (fig. 61).

Trois cas sont possibles. — a)  $W_1 > W_2$ . — L'appareil reçoit plus d'énergie qu'il n'en cède, il s'échauffe; c'est le cas du radiateur qui vient d'être branché.

b)  $W_1 < W_2$ . — L'appareil *cède plus* d'énergie qu'il n'en reçoit, il se refroidit; c'est le cas du radiateur qui vient d'être débranché.

c)  $W_1 = W_2$ . — L'appareil *cède exactement autant* d'énergie thermique qu'il en reçoit, sa température ne varie plus, il a atteint sa **température d'équilibre**; c'est

le cas du radiateur après quelques minutes de fonctionnement.

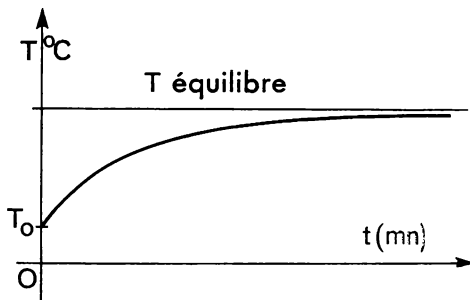


Fig. 62.

4° **Courbe d'échauffement.** — C'est la courbe donnant la température de l'appareil en fonction du temps (fig. 62).

## INCONVÉNIENTS DE L'EFFET JOULE

### 73. Pertes et échauffement.

1° Chaque fois que le dégagement de chaleur n'est pas recherché l'effet joule est nuisible.

Il en est ainsi dans la majorité des applications de l'électricité.

2° **Pertes d'énergie par effet joule.** — Elles sont données par la loi de Joule :  $W = RI^2t$ .

Ces pertes présentent plusieurs inconvénients :

a) Elles diminuent le rendement des appareils;  
b) Elles causent un échauffement qui, s'il était excessif, pourrait détériorer les isolants qui entourent les fils et provoquer des courts-circuits;

c) La limitation de cet échauffement à une valeur compatible avec le bon fonctionnement des appareils impose une limitation de leur puissance.

### 74. Limitation du courant dans les conducteurs.

1° La nécessité où l'on se trouve d'avoir dans les conducteurs un échauffement limité, variable suivant les usages, impose de ne pas dépasser dans ces conducteurs une certaine *densité de courant*.

2° **DÉFINITION.** — La densité de courant dans un conducteur est le quotient de l'intensité du courant par la section du fil :

$$(16) \quad \boxed{\Delta = \frac{I}{S}} \quad \left\{ \begin{array}{l} I \text{ en A} \\ S \text{ en mm}^2 \\ \Delta \text{ en A/mm}^2 \end{array} \right.$$

3° La densité de courant admissible varie avec la température ambiante, l'élévation de température tolérée, les conditions de refroidissement, la nature du fil et la section du fil....

Nous retiendrons que la densité de courant varie de 1 à 5 A/mm<sup>2</sup> et que dans les machines tournantes elle est de l'ordre de 2 A/mm<sup>2</sup>.

4° **Remarque.** — La chute de tension dans un fil de nature et de longueur données, est proportionnelle à la densité de courant dans le fil, en effet :

$$u = rI = \rho \frac{l}{S} I = \rho l \frac{I}{S}$$

$\frac{I}{S}$  est exprimé en A/m<sup>2</sup>

On a donc :

$$\frac{I}{S} = 10^6 \Delta$$

puisque  $\Delta$  est en A/mm<sup>2</sup> et que 1 m<sup>2</sup> = 10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>.

Finalement  $u = \rho \Delta \cdot 10^6$  et pour deux fils  $2u = 2 \cdot \rho \Delta \cdot 10^6$ .

## 75. Incidents de circuit.

1° **Court-circuit** (fig. 63). — Lorsque deux points se trouvant à des potentiels très différents l'un de l'autre sont fortuitement réunis par un conducteur de résistance négligeable, le courant qui prend naissance est très intense. Le dégagement de chaleur proportionnel au carré de l'intensité est énorme, l'échauffement est tel que les conducteurs sont portés au rouge et risquent d'enflammer les matériaux combustibles avoisinants.



Fig. 63. — La barre de fer court-circuite la lampe.

C'est ainsi que s'allument les incendies dûs à un court-circuit.

**2° Mauvais contact.** — Lorsqu'un mauvais contact existe entre deux points d'un circuit électrique, le courant est pratiquement inchangé mais la résistance, dite de contact, est grande entre les deux points et l'échauffement excessif détériore peu à peu l'appareil.

C'est le cas des bornes mal serrées, des fils mal reliés entre eux, des lames fixes d'un interrupteur qui ne serrent plus assez la lame mobile, etc.

## APPLICATIONS DE L'EFFET JOULE

### 76. Chauffage.

**1° D'appoint.** — Le chauffage électrique direct par radiateur portatif est onéreux parce que payé au tarif fort, il est utilisé soit en complément d'un autre chauffage, soit en intersaison quand la température ne justifie pas la mise en route du chauffage central par exemple.

**2° Principal.** — Pour que son prix de revient ne soit pas prohibitif il nécessite l'installation de poêles à accumulation qui consomment de l'énergie électrique pendant la nuit au tarif « heures creuses », très bon marché, et restituent pendant le jour la chaleur accumulée la nuit.

**3° Appareils électro-ménagers.** — Les cuisinières, fers à repasser, bouilloires, fers à souder sont évidemment des applications de l'effet joule. Ils possèdent un élément chauffant calculé pour fournir la *température désirée*.

### 77. Éclairage par incandescence.

Les lampes actuelles comportent un filament de tungstène porté à environ 2 600 °C dans un gaz inerte : argon, azote ou krypton.

Elles sont caractérisées par leur tension (en V) et leur puissance (en W). Le constructeur précise en outre le flux lumineux qu'elles fournissent. Ce flux est exprimé en lumens (lm).

EXEMPLE : 220 V, 60 W, 680 lm

Une lampe qui fonctionne avec une tension supérieure à sa tension nominale s'use plus vite et même grille immédiatement si la tension est double par exemple.

Une lampe qui fonctionne à une tension inférieure à sa tension nominale éclaire mal et ne donne pas le flux lumineux prévu.

Il faut savoir qu'une lampe à incandescence transforme en chaleur environ 98 % de l'énergie électrique reçue et le reste seulement en énergie lumineuse. *Son rendement n'est donc que de 2 %.*

C'est un appareil électrique extrêmement imparfait.

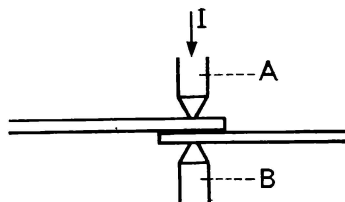


Fig. 64. — Un fort courant (10 000 A) passe de l'électrode A à l'électrode B à travers les deux tôles à souder.

## 78. Soudure électrique <sup>(1)</sup>.

Une soudure électrique par points comporte deux tiges conductrices entre lesquelles on presse fortement les deux pièces à souder (fig. 64).

Un courant très intense traverse les tôles à souder, les chauffe à blanc et réalise ainsi un point de soudure.

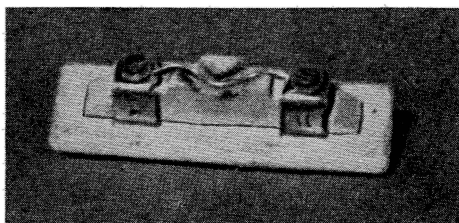
## 79. Fusible.

Un fusible (fig. 65) est destiné à protéger un circuit contre les surintensités accidentelles.

La température d'équilibre pour l'intensité nominale prévue doit être légèrement inférieure à sa température de fusion. Ainsi une surintensité le fera fondre et coupera le circuit.



Fig. 65. — Fusible et son symbole.



En pratique, si la fusion est instantanée quand la surintensité est grande (court-circuit) elle est plus lente et demande plusieurs minutes pour une surintensité de quelques %.

(1) En réalité on utilise le courant alternatif et non le continu.

Aujourd'hui, outre les fusibles, les installations comportent un **disjoncteur**, appareil dont l'action est plus rapide.

Les fusibles sont en alliage plomb-étain ou en aluminium. Leur diamètre varie avec l'intensité au delà de laquelle ils doivent fondre (voir tableau ci-dessous).

| Intensité<br>à protéger (A) | Diamètre du fusible<br>en plomb-étain (mm) |
|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 1                           | 0,8                                        |
| 5                           | 0,9                                        |
| 10                          | 1,4                                        |
| 20                          | 2,1                                        |

### 80. Ampèremètre thermique.

Pratiquement abandonné pour les mesures courantes on l'utilise sous une forme modernisée (thermo-couple) pour les mesures en courant alternatif « haute fréquence ».

## **PROBLÈMES**

### I. AVEC SOLUTION.

**11. 01.** — On désire disposer d'une tension  $U' = 1\,500\text{ V}$  à l'arrivée d'une ligne de 3 km de longueur (en cuivre,  $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ). La puissance maximale à fournir est de 60 kW quand tous les appareils sont en fonctionnement.

1° Quelle est en volts la chute de tension en ligne pour les densités de courant suivantes :

$$1 - 3 - 5 \text{ A/mm}^2?$$

2° Déterminer la densité de courant pour que la chute de tension soit égale à 16 % de la tension à l'arrivée.

3° Calculer l'intensité du courant maximal à fournir et la section de la ligne.

## — SOLUTION —

1°) Chute de tension (2 fils) :

$$\begin{aligned} \text{pour } 1 \text{ A/mm}^2 \quad u &= 2\rho l \Delta \cdot 10^6 \\ &= 2 \times 1,6 \cdot 10^{-8} \times 3 \cdot 10^3 \times 1 \cdot 10^6 \\ &= 96 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{pour } 3 \text{ A/mm}^2 \quad 96 \times 3 = 288 \text{ V}$$

$$\text{pour } 5 \text{ A/mm}^2 \quad 96 \times 5 = 480 \text{ V}$$

2°) Chute de tension admise :

$$u = 1\,500 \times \frac{16}{100} = 240 \text{ V}$$

Densité de courant correspondante :

$$\Delta = \frac{u}{2\rho l} \cdot 10^{-6}$$

ou mieux puisque pour 1 A/mm<sup>2</sup> on a 96 V :

$$\Delta = \frac{240}{96} = 2,5 \text{ A/mm}^2$$

$$3^\circ) \text{ Intensité du courant : } I = \frac{P}{U'} = \frac{60\,000}{1\,500} = 40 \text{ A}$$

$$\text{Section du fil : } S = \frac{I}{\Delta} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ mm}^2$$

**11. 02. — Avec les données et les réponses du problème précédent, calculer :**

1° La résistance de la ligne;

2° La tension au départ;

3° Les pertes joules en watts et en %.

## — SOLUTION —

1°) Résistance d'un fil :

$$r = \frac{\rho l}{S} = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \times 3 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^{-6}} = 3 \, \Omega$$

donc  $2r = 6 \, \Omega$  pour toute la ligne.

On vérifie immédiatement (chute de tension) :

$$u = 2rI = 6 \times 40 = 240 \text{ V}$$

2°) Tension au départ :

$$\begin{aligned} U &= U' + 2r \cdot I = 1\,500 + 240 \\ &= 1\,740 \text{ V} \end{aligned}$$

3°) Pertes joules

$$\begin{aligned} p &= 2rI^2 = 6 \times 40 \times 40 \\ &= 9\,600 \text{ W} \end{aligned}$$

soit en % :

$$\frac{9\,600}{60\,000} \times 100 = 16 \%$$



REMARQUE. — On obtient le même pourcentage pour la chute de tension et les pertes joules. En effet :

$$\frac{2rI^2}{UI} = \frac{2rI}{U}$$

### CE PROBLÈME EST DONNÉ ET TRAITÉ A TITRE DOCUMENTAIRE.

11. 03. — On réunit accidentellement deux bornes entre lesquelles la différence de potentiel est de 120 V par un fil de cuivre de 2 m de longueur et de 1 mm<sup>2</sup> de section.

La température ambiante étant de 20 °C et le fil n'ayant pratiquement pas le temps de se refroidir, en combien de temps la fusion est-elle provoquée?

On rappelle les propriétés physiques du cuivre :

Résistivité :  $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ ;

Masse volumique :  $\mu = 8\,800 \text{ kg/m}^3$ ;

Chaleur spécifique :  $c = 388 \text{ J/}^\circ\text{C.kg}$ ;

Température de fusion :  $T_f = 1\,080 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### — SOLUTION —

Première partie. — Résistance du fil ( $S = 10^{-6} \text{ m}^2$ ) :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \times 2}{10^{-6}} = 0,032 \Omega$$

Courant de court-circuit :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{0,032} = 3\,750 \text{ A}$$

Puissance dissipée :  $P = RI^2 = 0,032 \times 3\,750 \times 3\,750$   
 $= 450\,000 \text{ W}$

Deuxième partie. — Volume du cuivre :

$$V = l \times S = 2 \times 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Masse du cuivre :

$$m = \mu V = 8\,800 \times 2 \cdot 10^{-6}$$

$$= 17,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Énergie calorifique nécessaire à la fusion :

$$W = mc (T_f - T_0)$$

$$= 17,6 \cdot 10^{-3} \times 388 \times 1\,060$$

$$= 7\,250 \text{ J}$$

Conclusion. — Temps nécessaire à la fusion :

$$t = \frac{W}{P} = \frac{7\,250}{450\,000} = 16 \text{ ms}$$

REMARQUE. — Cette solution donne une idée du phénomène mais elle n'est qu'approchée.

Nous avons négligé, par exemple, la variation de résistance due à l'échauffement.

## II. AVEC RÉPONSES.

**11. 04.** — Le filament d'une lampe de 75 W, 120 V, a une longueur de 50 cm et une section de  $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$ . Calculer :

- 1° La résistance du fil;
- 2° Sa résistivité;
- 3° La densité du courant.

*N. B.* — Les valeurs trouvées sont des valeurs à chaud puisqu'elles sont calculées à partir des données de fonctionnement.

Réponses :  $192 \ \Omega$ ;  $76,8 \cdot 10^{-8} \ \Omega\text{m}$ ;  $312 \text{ A/mm}^2$ .

**11. 05.** — Une résistance de charge en ferro-nickel ( $\rho_0 = 80 \cdot 10^{-8} \ \Omega\text{m}$ ) doit absorber un courant de 25 A sous une différence de potentiel de 220 V à la température de  $100^\circ\text{C}$ . La densité de courant admise pour cette température et compte tenu des conditions de refroidissement est  $10 \text{ A/mm}^2$ . Calculer :

- 1° La section du fil;
- 2° La résistivité à  $100^\circ$  ( $\alpha = 0,004$ );
- 3° La résistance à  $100^\circ$  (en fonctionnement);
- 4° La longueur du fil.

Réponses :  $S = 2,5 \text{ mm}^2$                        $\rho_t = 112 \cdot 10^{-8} \ \Omega\text{m}$   
 $R = 8,8 \ \Omega$                                        $l = 20 \text{ m environ}$

## III. A RÉSOUDRE.

**11. 06.** — Calculer la longueur du filament en tungstène d'une lampe 100 W, 220 V sachant que la section du fil est  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$  et que la résistivité, à la température de fonctionnement est  $\rho = 70 \cdot 10^{-8} \ \Omega\text{m}$ .

**11. 07.** — Un radiateur fonctionne sous une différence de potentiel de 240 V et consomme un courant de 12 A. La résistance de chacun des fils qui l'alimentent est de  $0,4 \ \Omega$ . Calculer :

- 1° La puissance du radiateur;
- 2° Sa résistance;
- 3° La puissance dissipée par effet joule dans la ligne;
- 4° La section de la ligne pour que la densité de courant y soit de  $4 \text{ A/mm}^2$ .

**11. 08.** — Une lampe 60 W, 240 V est branchée sur le secteur 120 V. En admettant que sa résistance soit inchangée, calculer :

- 1° L'intensité du courant;
- 2° La puissance consommée.

**11. 09.** — Un rhéostat est constitué par un fil de maillechort de 400 m de longueur et de  $0,1 \text{ mm}^2$  de section. La densité de courant ne doit pas dépasser  $3 \text{ A/mm}^2$ . On rappelle que pour le maillechort  $\rho_0 = 34 \cdot 10^{-8}$  et  $\alpha = 0,25 \cdot 10^{-3}$ . Calculer :

- 1° La résistance du fil à  $0^\circ\text{C}$ ;
  - 2° La résistance à  $60^\circ\text{C}$ ;
  - 3° Le courant maximal et la tension maximale pour lesquels le rhéostat peut être utilisé.
-

## GROUPEMENT DE RÉSISTANCES EN SÉRIE

### 81. Description du montage.

Les résistances sont montées les unes à la suite des autres, le courant électrique les traverse successivement (fig. 66).

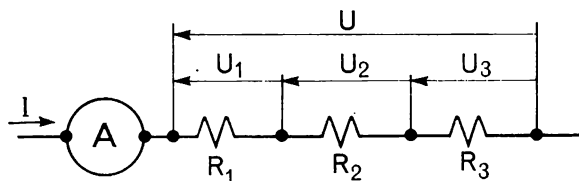


Fig. 66. — En mesurant successivement  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  et  $U$ , on vérifie la formule 17.

### 82. Lois.

**1° Intensité.** — L'intensité est la même tout au long du circuit (chap. 4, § 31), nous appellerons  $I$  sa valeur commune.

$I$  est commun

**2° Différence de potentiel.** — Nous avons appris (chap. 6) que dans un montage série la différence de potentiel totale est égale à la somme des différences de potentiel partielles :

(17)

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

3° **Résistance.** — Appliquons la loi d'Ohm à chaque résistance

$$U_1 = R_1 I \quad U_2 = R_2 I \quad U_3 = R_3 I$$

soit en reportant dans la relation (17)

$$\begin{aligned} U &= R_1 I + R_2 I + R_3 I \\ &= (R_1 + R_2 + R_3) I \end{aligned}$$

nous pouvons donc remplacer l'ensemble des trois résistances par une seule ayant pour valeur

(18)

$$\boxed{R_6 = R_1 + R_2 + R_3}$$

En appliquant la même différence de potentiel à cette résistance  $R_6$  nous aurons le même courant qu'avec les trois résistances initiales. Une telle résistance est appelée **résistance équivalente** (sous-entendu, à l'ensemble des autres).

### 83. Définition de la résistance équivalente.

On appelle **résistance équivalente** à plusieurs autres la **résistance** qui, soumise à la même différence de potentiel, est traversée par le même courant.

REMARQUE. — Dans le cas du montage série, la résistance équivalente est égale à la somme des résistances.

### 84. Exercice.

Deux résistances de  $6 \, \Omega$  et de  $4 \, \Omega$  sont montées en série, on applique à l'ensemble une différence de potentiel de  $40 \, \text{V}$ . Calculer l'intensité du courant dans le circuit et la différence de potentiel entre les bornes de chaque résistance (fig. 67).

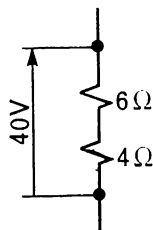


Fig. 67.

— SOLUTION —

Résistance équivalente :  $R_6 = R_1 + R_2 = 6 + 4 = 10 \, \Omega$ .

Intensité du courant :  $I = \frac{U}{R_6} = \frac{40}{10} = 4 \, \text{A}$

Différences de potentiel :  $U_1 = R_1 I = 6 \cdot 4 = 24 \, \text{V}$   
 $U_2 = R_2 I = 4 \cdot 4 = 16 \, \text{V}$

*Vérification.* — La somme des différences de potentiel doit être égale à la différence de potentiel appliquée :

$$U = U_1 + U_2 = 24 + 16 = 40 \text{ V}$$

## 85. Applications.

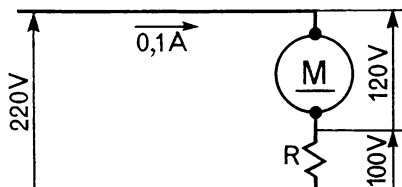


Fig. 68.

**1° Résistance additionnelle d'appareil électrique.** — Lorsqu'un appareil est prévu pour fonctionner sous une tension donnée et que l'on veut l'utiliser sous une tension plus élevée il faut « chuter » les volts en excès à l'aide d'une résistance.

Par exemple, un rasoir électrique est prévu pour fonctionner sous 120 volts, il consomme alors 0,1 ampère, quelle résistance faut-il monter en série avec lui si la tension disponible est de 220 volts ? (fig. 68).

— SOLUTION —

Le rasoir doit avoir une différence de potentiel de 120 V et être traversé par 0,1 A ; la résistance doit donc chuter les 100 V en excès quand elle est traversée par 0,1 A. Sa résistance doit avoir la valeur suivante :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,1} = 1\,000 \, \Omega.$$

Il est bon de noter que la puissance consommée par la résistance est dissipée en chaleur. Le fonctionnement n'est pas économique, c'est sans gravité dans l'exemple choisi car un rasoir ne consomme pas beaucoup d'énergie et le rendement du système importe peu. Il n'en serait pas de même avec un moteur plus puissant (voir Problème 12. 09).

**2° Résistance additionnelle de voltmètre** (fig. 69). — Un voltmètre est constitué par un cadre mobile de résistance pas très élevée que l'on doit mettre en série avec de fortes résistances pour mesurer des tensions. Nous allons traiter un exemple numérique.

La résistance du cadre mobile d'un voltmètre est 120 ohms. La déviation totale de l'aiguille correspond à un courant de 0,01 ampère à travers le cadre. Quelle résistance faut-il mettre en série avec le cadre pour obtenir chacun des calibres suivants 3 V ; 15 V ; 75 V ?

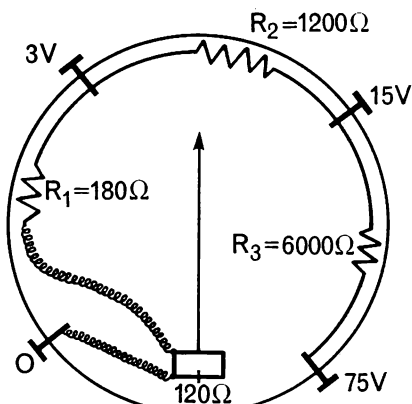


Fig. 69.

## — SOLUTION —

**Calibre 3 V.** — La déviation doit être totale pour 3 V, or elle le sera si le courant est 0,01 A; la résistance du circuit doit être :

$$R_t = \frac{3}{0,01} = 300 \, \Omega$$

mais le cadre seul a déjà une résistance de 120  $\Omega$ , il faut ajouter :

$$R_1 = 300 - 120 = 180 \, \Omega$$

**Calibre 15 V.** — On aura de même :

$$R_t = \frac{15}{0,01} = 1\,500 \, \Omega;$$

compte tenu des 300  $\Omega$  déjà en place, il faut ajouter :

$$R_2 = 1\,500 - 300 = 1\,200 \, \Omega$$

**Calibre 75 V :**

$$R_t = \frac{75}{0,01} = 7\,500 \, \Omega \qquad R_3 = 7\,500 - 1\,500 = 6\,000 \, \Omega$$

**REMARQUE.** — Sur les voltmètres récents la consommation n'est plus portée. On y trouve par contre la **résistance spécifique** exprimée en  $\Omega/V$ .

**EXEMPLE.** — Au lieu de 0,01 A on lirait 100  $\Omega/V$  c'est-à-dire l'inverse du courant puisque  $1 \, A = \frac{1 \, V}{1 \, \Omega} = 1 \, V/\Omega$ .

La résistance totale d'un voltmètre, sur un calibre donné, s'obtient en multipliant le calibre par la résistance spécifique.

**EXEMPLE.** — Sur 75 V pour 100  $\Omega/V$ .

On a  
 $R = 75 \times 100 = 7\,500 \, \Omega$

Les voltmètres modernes ont une résistance spécifique élevée : 1 000  $\Omega/V$ , 10 000  $\Omega/V$  et même davantage.

**3° Rhéostats.** — Un rhéostat est une résistance variable que l'on insère en série dans un circuit pour faire varier le courant bien que la tension totale appliquée soit constante (fig. 70).

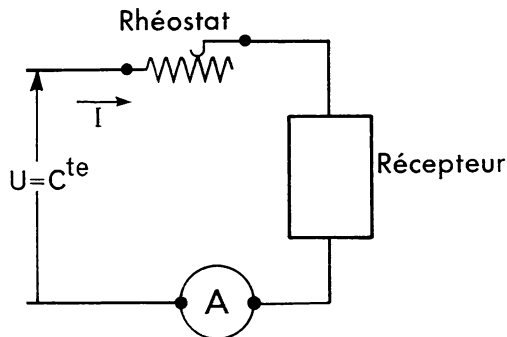


Fig. 70. — Le rhéostat permet de faire varier  $I$  bien que  $U$  soit constant.

Les deux principaux types de rhéostats sont les **rhéostats à curseur** qui permettent une variation pratiquement continue de la résistance (fig. 71) et les **rhéostats à plots** dont la résistance varie d'une manière discontinue (fig. 72).

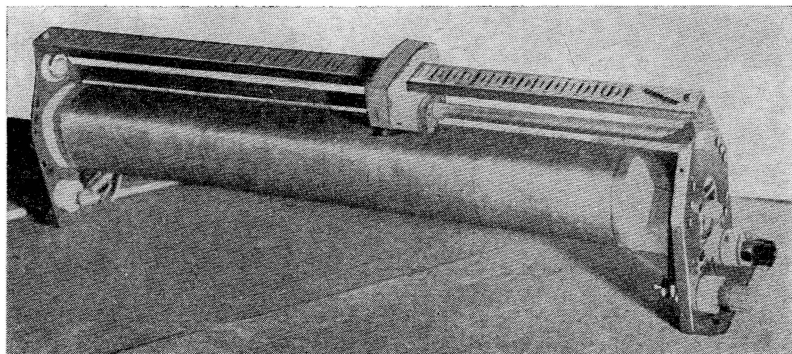


Fig. 71. — Rhéostat à curseur.

Fig. 72. — Rhéostat à curseur. La résistance comprise entre les bornes A et B croît quand on tourne la manette vers la droite.

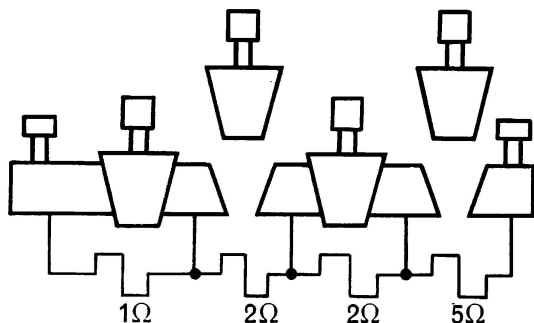
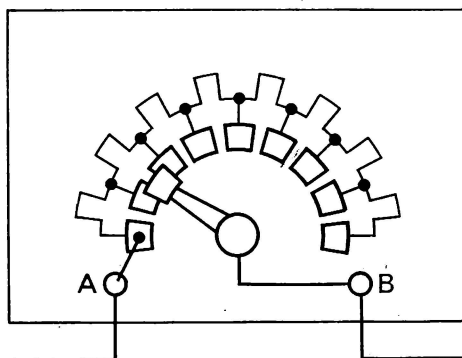


Fig. 73. — Boîte à chevilles. Il y a  $2 + 5 = 7$  ohms en circuit.



**4° Boîtes de résistances étalonnées.** — Elles sont constituées de résistances dont les valeurs sont connues avec précision (0,2 ou 0,1 %) et permettent des mesures de qualité.

On trouvera (fig. 73) le schéma d'une *boîte à chevilles*. Lorsque l'on met une cheville, on court-circuite la résistance correspondante. On

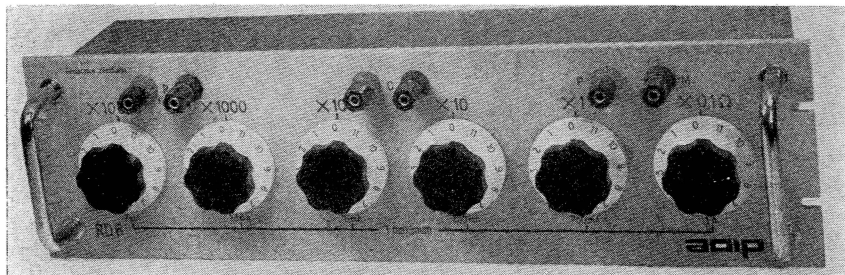


Photo AOIP.

Fig. 74. — Boîte de résistances à décades.

remarquera les valeurs 1, 2, 2, 5 qui permettent toutes les combinaisons de 1 à 10 ohms.

La fig. 74 est la photographie d'une *boîte de résistances à décades*. Celle-ci permet d'obtenir toutes les valeurs de 0,1 à 122 222,1  $\Omega$  par dixième d'ohm.

## **86. Conductance.**

**1° Définition.** — La conductance (G) est l'inverse de la résistance.

**2° Formule :**

$$(19) \quad \boxed{G = \frac{1}{R}}$$

**3° Unité.** — L'unité de conductance est le siemens (S).

**EXEMPLE.** — La conductance d'une résistance de 10  $\Omega$  est :

$$G = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ S}$$

On utilise aussi le microsiemens ( $\mu\text{S}$ ) 1  $\mu\text{S} = 10^{-6}$  S  
et le mégasiemens (MS) 1 MS =  $10^6$  S.

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

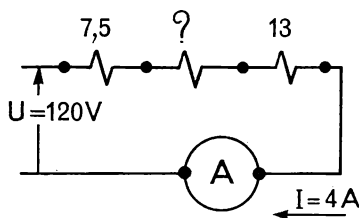


Fig. 75.

**12. 01.** — Un générateur de 120 V de différence de potentiel débite dans un circuit comprenant trois résistances en série :  $R_1 = 7,5 \, \Omega$ ,  $R_2$  inconnue,  $R_3 = 13 \, \Omega$ . Calculer la résistance inconnue et la différence de potentiel entre les bornes de chaque résistance sachant que le courant dans le circuit est de 4 A (fig. 75).

— SOLUTION —

Résistance équivalente :  $R_e = \frac{120}{4} = 30 \, \Omega$

Résistance inconnue :

$$R_2 = R_e - (R_1 + R_3) = 30 - (13 + 7,5) = 9,5 \, \Omega$$

Différence de potentiel :  $U_1 = R_1 I = 7,5 \cdot 4 = 30 \, \text{V}$

$$U_2 = R_2 I = 9,5 \cdot 4 = 38 \, \text{V}$$

$$U_3 = R_3 I = 13 \cdot 4 = 52 \, \text{V}$$

Le total  $30 + 38 + 52 = 120$  permet de vérifier les calculs.

**12. 02.** — On monte en série sur le secteur à 240 V deux lampes prévues pour fonctionner sur 120 V. En admettant que la résistance des lampes soit inchangée montrer que le fonctionnement de ces lampes est en général incorrect. On s'aidera des cas suivants :

1° 2 lampes de 60 W ;

2° 1 lampe de 60 W et une de 75 W ;

3° 1 lampe de 40 W et une de 60 W.

(On calculera la résistance de chaque lampe, puis la tension à laquelle elle est soumise.)

— SOLUTION —

Calcul des résistances :  $R = \frac{U^2}{P} = \frac{14\,400}{P}$

Lampe de 40 W :  $R_1 = \frac{14\,400}{40} = 360 \, \Omega$

Lampe de 60 W :  $R_2 = \frac{14\,400}{60} = 240 \, \Omega$

Lampe de 75 W :  $R_3 = \frac{14\,400}{75} = 192 \, \Omega$

1°) Résistance équivalente :  $R_e = 240 + 240 = 480 \, \Omega$

Courant commun :  $I = \frac{U}{R_e} = \frac{240}{480} = 0,5 \, \text{A}$

Différence de potentiel. — Elles sont toutes deux de :  
 $U = RI = 240 \times 0,5 = 120 \, \text{V}$

le fonctionnement est correct.

2°) Résistance équivalente :

$$R_e = 240 + 192 = 432 \, \Omega$$

Courant commun :  $I = \frac{U}{R_e} = \frac{240}{432} = \frac{5}{9} \, \text{A}$

Différence de potentiel :

Pour  $R_2$  :  $240 \times \frac{5}{9} = \frac{1\,200}{9} \simeq 133 \, \text{V}$

Pour  $R_3$  :  $192 \times \frac{5}{9} = \frac{960}{9} \simeq 107 \, \text{V}$

3°) On trouve de même :

$$R_2 = 360 + 240 = 600 \, \Omega$$

$$I = \frac{240}{600} = 0,4 \, \text{A}$$

Pour  $R_1$  :  $360 \times 0,4 = 144 \, \text{V}$

Pour  $R_2$  :  $240 \times 0,4 = 96 \, \text{V}$

*Conclusion.* — Si l'on monte en série deux lampes de 120 V sous une différence de potentiel de 240 V.

— Le fonctionnement est correct si les lampes ont une même puissance.

— Si les puissances sont différentes :

la plus puissante éclaire mal ; la moins puissante est en surtension.

Ces résultats peuvent être généralisés.

**12. 03.** — On applique une différence de potentiel de 120 V à une résistance de 50  $\Omega$ .

1° Quelle est l'intensité du courant ;

2° Calculer la conductance et montrer que  $I = GU$ .

## — SOLUTION —

$$1^{\circ} \text{ Intensité : } I = \frac{U}{R} = \frac{120}{50} = 2,4 \text{ A}$$

$$2^{\circ} \text{ Conductance } G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ S}$$

$$\begin{aligned} \text{Intensité : } I &= \frac{U}{R} = \frac{U}{\frac{1}{G}} = GU \\ &= 0,02 \times 120 = 2,4 \text{ A} \end{aligned}$$

II. AVEC RÉPONSES.

12. 04. — On applique une différence de potentiel de 240 V à trois résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  montées en série.

On connaît  $R_1 = 8 \text{ } \Omega$ ,  $R_3 = 15 \text{ } \Omega$  et la mesure de  $U_2$  donne 56 V. Calculer :

- 1° L'intensité du courant;
- 2° La résistance équivalente;
- 3° La résistance  $R_2$ .

Réponses :  $I = 8 \text{ A}$ ;  $R_6 = 30 \text{ } \Omega$ ;  $R_2 = 7 \text{ } \Omega$ .

12. 05. — Le cadre d'un voltmètre a une résistance de 375  $\Omega$ . La déviation de l'appareil est totale pour un courant de 1 mA. Calculer la résistance additionnelle qui permet de mesurer les tensions jusqu'à 3 V.

Réponse :  $R = 2\,625 \text{ } \Omega$ .

III. A RÉSOUDRE.

12. 06. — Calculer mentalement le courant et la différence de potentiel entre les bornes de chaque résistance quand on monte en série sous 100 V les résistances suivantes :

- a) 3  $\Omega$  et 7  $\Omega$ ; b) 13  $\Omega$  et 7  $\Omega$ ; c) 2  $\Omega$ , 5  $\Omega$  et 3  $\Omega$ .

12. 07. — Calculer la conductance des résistances suivantes :

1  $\Omega$  — 100  $\Omega$  — 1 000  $\Omega$  — 1 M $\Omega$  — 200  $\Omega$

12. 08. — Trois résistances de 8, 11 et 14  $\Omega$  sont montées en série. La tension totale est inconnue mais on sait que la tension entre les bornes de la résistance de 11  $\Omega$  est de 44 V. Calculer le courant commun aux résistances, la tension entre les bornes de chacune d'elles et la tension totale. Quelle est la puissance consommée par chaque résistance?

**12. 09.** — Un moteur prévu pour fonctionner sous 120 V doit être utilisé avec une tension de 220 V. Sa consommation sous tension normale étant de 8 A. Calculer :

- 1° La résistance à mettre en série avec lui pour qu'il fonctionne normalement ;
- 2° La puissance consommée par cette résistance ;
- 3° Le coût annuel de l'énergie perdue dans la résistance à raison de 8 h de fonctionnement journalier (300 jours par an). 1 kWh coûte 0,11 F ;
- 4° Un moteur de même puissance mais fonctionnant sous 220 V coûte 350 F. En combien de temps l'achat de ce moteur est-il amorti par l'énergie économisée ?

**12. 10.** — La résistance spécifique d'un voltmètre est  $20\,000\ \Omega/V$ . On veut transformer le calibre 150 V en calibre 500 V. Quelle résistance faut-il ajouter en série ?

---

## GROUPEMENT DE RÉSISTANCES EN PARALLÈLE

### 87. Description du montage.

Les résistances sont montées entre deux bornes communes A et B (fig. 76).

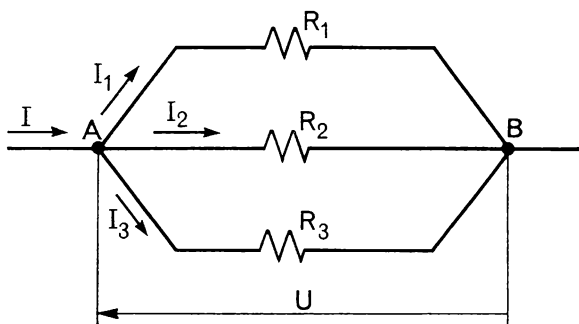


Fig. 76.

### 88. Lois.

1° **Différence de potentiel.** — Les deux bornes A et B étant communes, la différence de potentiel est commune; nous appellerons  $U$  sa valeur.

$U$  est commune

2° **Intensité.** — L'intensité dans le circuit principal est égale à la somme des intensités des différentes dérivations (chap. IV, § 32).

(20)

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

3° **Résistance.** — Appliquons la loi d'Ohm à chaque résistance :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad I_3 = \frac{U}{R_3},$$

soit en reportant dans la relation (20) :

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

$$I = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

et en divisant les deux membres par  $U$  :

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Or d'après la définition de la résistance équivalente (§ 83), le quotient de  $U$  par  $I$  est  $R_6$ , donc le quotient de  $I$  par  $U$  est l'inverse de  $R_6$  soit :

$$\frac{1}{R_6} = \frac{I}{U}$$

On obtient la relation :

$$(21) \quad \boxed{\frac{1}{R_6} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

ce qui donne la règle : Dans un montage en parallèle l'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des inverses des différentes résistances.

REMARQUE. — En se rappelant que la conductance est l'inverse de la résistance (§ 86) on obtient la règle plus facile à énoncer : la conductance équivalente est égale à la somme des conductances :

$$(21 \text{ bis}) \quad \boxed{G_6 = G_1 + G_2 + G_3}$$

### 89. Exercice.

Trois résistances  $R_1 = 4 \, \Omega$ ,  $R_2 = 6 \, \Omega$ ,  $R_3 = 12 \, \Omega$  sont montées en parallèle et soumises à une différence de potentiel de 18 V. Calculer la résistance équivalente, le courant dans chaque résistance et le courant total (revoir fig. 76).

## — SOLUTION —

Résistance équivalente :

$$\frac{1}{R_6} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12} = \frac{6}{12}$$

d'où 
$$R_6 = \frac{12}{6} = 2 \, \Omega.$$

Courants partiels :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{18}{4} = 4,5 \, \text{A} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{18}{6} = 3 \, \text{A} \quad I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{18}{12} = 1,5 \, \text{A}$$

Courant total :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 4,5 + 3 + 1,5 = 9 \, \text{A}$$

Vérification : 
$$U = R_6 I = 2 \cdot 9 = 18 \, \text{V}$$

### 90. Cas particuliers.

**1° Plusieurs résistances identiques.** — Soit  $n$  résistances de valeur  $r$  en parallèle.

La différence de potentiel est toujours commune, soit  $U$ .

Toutes les intensités sont égales :  $i = \frac{U}{r}$ .

On a donc pour l'intensité totale :

$$I = \underbrace{i + i + i + \dots + i}_{n \text{ fois}}$$

$$I = ni$$

Enfin la résistance équivalente est :

$$\frac{1}{R_6} = \underbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}_{n \text{ fois}}$$

$$\frac{1}{R_6} = \frac{n}{r} \quad R_6 = \frac{r}{n}$$

**2° Deux résistances seulement en parallèle.** — Soient  $R_1$  et  $R_2$  (fig. 77).

La tension est commune :  $U$ ; l'intensité totale est  $I = I_1 + I_2$ , la résistance est donnée par :

$$\frac{1}{R_6} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



Réduisons au même dénominateur :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

d'où

$$(22) \quad R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

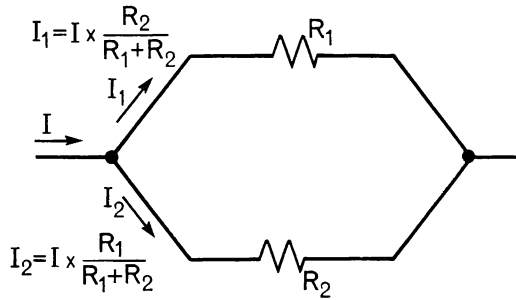


Fig. 77.

**RÈGLE.** — Quand deux résistances sont montées en parallèle la résistance équivalente est égale au quotient de leur produit par leur somme.

*Calcul des courants.* — La loi d'Ohm appliquée aux deux résistances donne :  
 $U = R_1 I_1 = R_2 I_2$ .

Appliquons les propriétés des proportions :

$$\frac{I_1}{R_2} = \frac{I_2}{R_1} = \frac{I_1 + I_2}{R_2 + R_1} = \frac{I}{R_1 + R_2}$$

d'où :

$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

ce qui peut s'énoncer d'une manière facile à retenir : le courant dans une résistance est égal au courant total multiplié par l'autre résistance et divisé par la somme des résistances.

## 91. Applications.

**1° Shunt d'ampèremètre.** — On appelle shunt une résistance destinée à dériver une partie du courant; elle se monte donc en parallèle avec l'appareil.

Les shunts d'ampèremètre permettent de mesurer des courants très différents avec le même appareil. Traitons un exemple de calcul.

Soit un ampèremètre dont le cadre mobile a une résistance de 5 ohms et dont la déviation est maximale pour un courant 0,02 A.

La déviation est donc maximale pour une différence de potentiel de :

$$U = 5 \cdot 0,02 = 0,1 \text{ V}$$

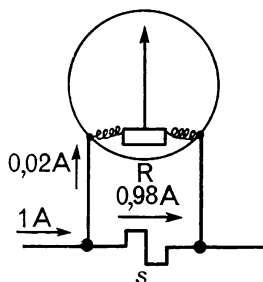


Fig. 78.

On désire que cet appareil ait les calibres suivants : 1 A et 3 A. Calculer la résistance du shunt à utiliser dans chaque cas (fig. 78).

**Calibre 1 A.** — Pour la déviation maximale le shunt devra dériver  $I' = 1 - 0,02 = 0,98$  A, or sa tension sera celle du cadre soit 0,1 V d'où sa résistance :

$$s = \frac{0,1}{0,98} = 0,10\ 204\ \Omega$$

On remarquera que  $s$  devant appartenir à un appareil de mesure il faut calculer sa valeur avec une précision inhabituelle.

Le shunt a multiplié les possibilités de l'ampèremètre par  $m = \frac{1}{0,02} = 50$ , on dit que son pouvoir multiplicateur est de 50.

**Calibre 3 A.** — Le shunt devra dériver  $I' = 3 - 0,02 = 2,98$  A

$$s = \frac{0,1}{2,98} = 0,03\ 356\ \Omega$$

$$m = \frac{3}{0,02} = 150$$

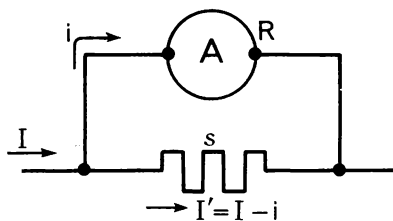


Fig. 79.

**PROBLÈME GÉNÉRAL** (fig. 79).

— Soit  $R$  la résistance du cadre et  $i$

le courant correspondant à la déviation maximale. Pour mesurer un courant  $I$  le shunt doit dériver  $I' = I - i$ . Écrivons que le shunt et l'ampèremètre ont la même différence de potentiel  $U = s(I - i) = Ri$  d'où :

$$s = R \cdot \frac{i}{I - i}$$

Le pouvoir multiplicateur est  $\frac{I}{i} = m$ ; aussi la formule donnant  $s$  peut s'écrire en divisant numérateur et dénominateur par  $i$  :

$$s = R \cdot \frac{1}{\frac{I}{i} - 1} = \frac{R}{m - 1} \quad s = \frac{R}{m - 1}$$

2° **Rhéostat de lampes** (fig. 80). — Toutes les lampes sont en parallèle. Chaque lampe mise en circuit diminue la résistance équivalente à l'ensemble et par suite le courant du circuit principal augmente.

3° **Rhéostat monté en potentiomètre** (fig. 81). — La tension  $U'$  croît quand on déplace le curseur C de A vers B mais elle n'est proportionnelle à la résistance AC que si aucune charge n'est montée entre A et C (voir Problème 13. 03).

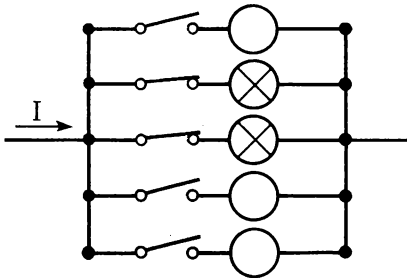


Fig. 80. — Rhéostat de lampes.

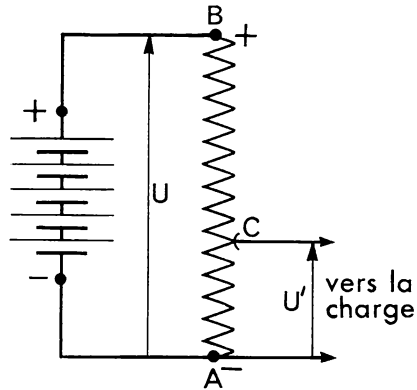


Fig. 81.

## 92. Remarque importante.

On vérifiera avec l'exercice du § 89 et avec les résultats de tous les problèmes donnés en fin de leçon que la **résistance équivalente** est toujours plus petite que la plus petite des résistances montées en parallèle.

## **PROBLÈMES**

### I. AVEC SOLUTION.

13. 01. — Un courant de 51,5 A se partage entre quatre résistances,  $R_1 = 2 \, \Omega$ ,  $R_2 = 3 \, \Omega$ ,  $R_3 = 5 \, \Omega$ ,  $R_4 = 9 \, \Omega$ , montées en parallèle. Calculer le courant dans chacune d'elles.

## — SOLUTION —

Résistance équivalente :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \frac{1}{9} = \frac{45 + 30 + 18 + 10}{90} = \frac{103}{90} \quad \text{d'où} \quad R_e = \frac{90}{103}$$

Le résultat numérique de ce calcul n'étant pas demandé il est inutile d'effectuer la division, nous conserverons la fraction dans l'espoir d'une simplification ultérieure.

Calcul de la tension :

$$U = R_e I = \frac{90}{103} \cdot 51,5 = 45 \text{ V.}$$

Calcul des courants :

$$I_1 = \frac{45}{2} = 22,5 \text{ A} \quad I_2 = \frac{45}{3} = 15 \text{ A} \quad I_3 = \frac{45}{5} = 9 \text{ A} \quad I_4 = \frac{45}{9} = 5 \text{ A.}$$

$$\text{Vérification: } I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 22,5 + 15 + 9 + 5 = 51,5 \text{ A.}$$

**13. 02.** — Un courant de 15 A se partage entre deux résistances en parallèle de 4 et 6  $\Omega$ . Calculer la résistance équivalente et le courant dans chaque résistance.

## — SOLUTION —

Nous appliquerons les lois relatives à deux résistances et nous ne calculerons la ddp qu'à titre de vérification.

Résistance équivalente :

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2,4 \Omega.$$

Courants :

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15 \frac{6}{10} = 9 \text{ A} \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 15 \frac{4}{10} = 6 \text{ A.}$$

$$\text{Vérification: } U = 4 \cdot 9 = 6 \cdot 6 = 2,4 \cdot 15 = 36 \text{ V.}$$

**13. 03.** — Un rhéostat de 150  $\Omega$  est monté en potentiomètre. On applique entre les bornes extrêmes A et B une différence de potentiel de 210 V. Le curseur est placé au milieu. Calculer la différence de potentiel  $U'$  entre A et C :

1° Quand aucune charge n'est montée (fig. 82);

2° Quand on place entre A et C une résistance de 150  $\Omega$  (fig. 83);

3° Quand on place une résistance de 50  $\Omega$ .

## — SOLUTION —

1°) Le circuit est constitué par le seul potentiomètre, les résistances entre A et C d'une part et entre B et C d'autre part sont égales, donc les tensions le sont aussi :

$$U_1 = U_2 = \frac{210}{2} = 105 \text{ V}$$

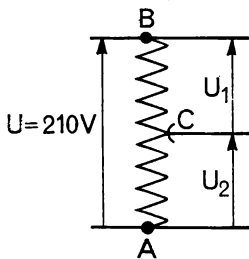


Fig. 82.

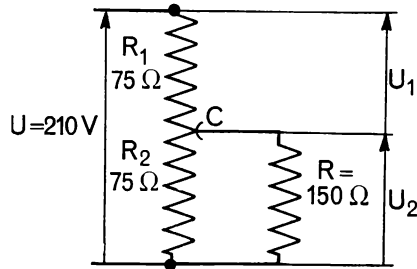


Fig. 83.

2°)  $R_2 = 75$  et  $R = 150$  sont en parallèle et  $R_1$  est en série avec leur groupement. Résistance équivalente à  $R$  et  $R_2$  :

$$R_e = \frac{R R_2}{R + R_2} = \frac{75 \times 150}{225} = 50 \, \Omega$$

Résistance totale du circuit :

$$R_t = R_1 + R_e = 75 + 50 = 125 \, \Omega$$

Courant dans le circuit principal :

$$I = \frac{210}{125} = 1,68 \, \text{A}$$

$$U_1 = 75 \cdot 1,68 = 126 \, \text{V} \quad U_2 = 210 - 126 = 84 \, \text{V}$$

3°) Le calcul précédent reste valable avec les nouvelles valeurs :

$$R_e = \frac{75 \times 50}{75 + 50} = 30 \, \Omega \quad R_t = 75 + 30 = 105 \, \Omega$$

$$I = \frac{210}{105} = 2 \, \text{A} \quad U_1 = 75 \times 2 = 150 \, \text{V} \quad U_2 = 210 - 150 = 60 \, \text{V}$$

On peut remarquer que la tension entre A et C est d'autant plus petite que la résistance de charge est plus petite :

| R | $\infty$ | 150 | 50 |
|---|----------|-----|----|
| U | 105      | 84  | 60 |

## II. AVEC RÉPONSES.

13. 04. — Trois résistances  $R_1 = 6 \, \Omega$ ;  $R_2 = 4 \, \Omega$  et  $R_3 = 5 \, \Omega$  sont montées comme l'indique la figure 84. La tension appliquée entre A et B est  $U = 37 \, \text{V}$ .

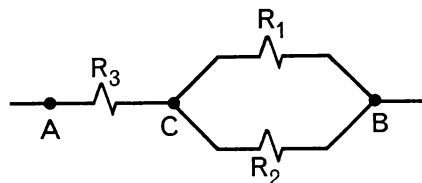


Fig. 84.

Calculer :

- 1° La résistance équivalente au groupement;
- 2° L'intensité du courant dans  $R_3$ ;
- 3° L'intensité du courant dans  $R_1$  et  $R_2$ ;
- 4° La tension entre A et C d'une part et entre C et B d'autre part.

Réponses :  $R_e = 7,4 \ \Omega$ ;  $I_s = 5 \text{ A}$ ;  $I_1 = 2 \text{ A}$   $I_2 = 3 \text{ A}$ ;  
 $U_{AC} = 25 \text{ V}$   $U_{CB} = 12 \text{ V}$

**13. 05.** — Un appareil a une résistance de  $2,005 \ \Omega$ . Par quelle résistance faut-il le shunter pour que la résistance équivalente à l'ensemble soit  $2 \ \Omega$ ?

Réponse :  $802 \ \Omega$ .

**13. 06.** — Calculer mentalement la résistance équivalente à deux résistances en parallèle ayant les valeurs suivantes ( $\Omega$ ) : 5 et 5; 6 et 4; 7 et 3; 8 et 2; 9 et 1.

**13. 07.** — Un ampèremètre a une résistance de  $8 \ \Omega$ . Il donne sa déviation maximale pour un courant de  $0,05 \text{ A}$ . Calculer le shunt qu'il faut lui adjoindre pour obtenir les calibres suivants :  $0,5 \text{ A}$ ;  $2 \text{ A}$ ;  $10 \text{ A}$ .

**13. 08.** — Un rhéostat de lampes est constitué par des lampes de  $100 \text{ W}$ ;  $120 \text{ V}$ . Combien faut-il en mettre en parallèle pour obtenir un courant de  $10 \text{ A}$  quand on lui applique une différence de potentiel de  $120 \text{ V}$ ?

**13. 09.** — Un courant de  $19 \text{ A}$  se partage entre trois résistances en parallèle valant respectivement  $3$ ,  $6$  et  $7,5 \ \Omega$ . Calculer le courant dans chaque résistance et la différence de potentiel commune. Vérifier.

**13. 10.** — On dispose de quatre résistances de  $60 \ \Omega$ .

1° Calculer les résistances obtenues quand on dispose deux, trois ou quatre éléments soit en série, soit en parallèle;

2° Déterminer les montages mixtes <sup>(1)</sup> qui permettent d'obtenir les valeurs suivantes :

$90 \ \Omega$ ;  $150 \ \Omega$ ;  $80 \ \Omega$ ;  $40 \ \Omega$ ;  $100 \ \Omega$

3° Chaque résistance supportant un courant maximal de  $2 \text{ A}$ , calculer pour les montages du 1° et les deux premiers du 2° le courant et la tension admissibles.

---

(1) Un montage qui ne comporte pas uniquement des résistances en série ou en parallèle est dit mixte. Il en est ainsi figure 84 par exemple.

## GÉNÉRATEURS

### 93. Définition.

Un **générateur** est un appareil qui absorbe de l'énergie sous une forme quelconque (sauf électrique) et qui restitue principalement de l'énergie électrique.

On peut évidemment parler de puissances au lieu d'énergies (fig. 85).

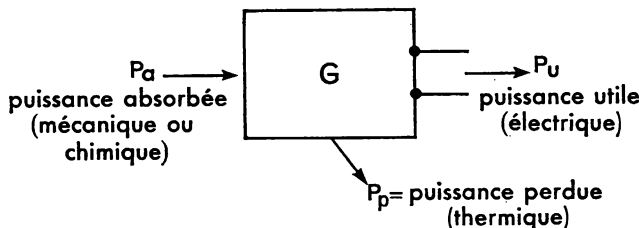


Fig. 85.

### 94. Générateurs usuels.

Les **générateurs usuels à courant continu** sont :

— Les piles qui transforment en énergie électrique l'énergie chimique en réserve dans leurs constituants. Elles sont définitivement hors d'usage après décharge totale.

— Les accumulateurs qui transforment en énergie électrique l'énergie chimique en réserve dans leurs constituants. Après décharge on peut les recharger, ils retrouvent leurs propriétés initiales.

— Les **générateurs tournants** (fig. 86), appelés *dynamos*, qui transforment en énergie électrique l'énergie mécanique qu'ils reçoivent d'un moteur.



Fig. 86. — Symbole d'un **générateur tournant** (mécanique).

### 95. Puissances électriques mises en jeu dans un générateur.

1° **Puissance utile ( $P_u$ ).** — C'est la puissance que fournit le générateur au circuit extérieur, elle est purement électrique. Nous savons la calculer (§ 52, chap. 7), si  $U$  est la différence de potentiel du générateur et  $I$  le courant qu'il débite on a :

$$P_u = UI$$

2° **Puissance perdue ( $P_j$ ).** — C'est la puissance perdue par effet joule à l'intérieur du générateur, elle est donnée par la loi de Joule, si  $r$  est la résistance interne du générateur :

$$P_j = rI^2$$

3° **Puissance électrique totale ( $P_{ET}$ ).** — Le générateur fournit donc :  $P_u = UI$  au circuit extérieur;  $P_j = rI^2$  à propre résistance.

La somme de ces deux puissances s'appelle la puissance électrique totale <sup>(1)</sup> :

$$P_{ET} = P_u + P_j$$

soit

$$P_{ET} = UI + rI^2$$

### 96. Force électromotrice.

1° Divisons par  $I$  les deux membres de la relation ci-dessus :

$\frac{P_{ET}}{I} = U + rI$ , le quotient  $\frac{P_{ET}}{I}$  se mesure en volts puisque c'est une somme de volts. Nous le représenterons par la lettre **E** et nous l'appellerons **force électromotrice** du générateur (en abrégé **f.é.m.**) :

$$E = \frac{P_{ET}}{I}$$

On peut donc écrire :  $E = U + rI$ .

2° **Définition.** — La force électromotrice d'un générateur est le quotient de sa puissance électrique totale par l'intensité du courant qu'il débite.

---

(1) La puissance absorbée par un générateur est égale à la puissance électrique totale augmentée des pertes autres que les pertes joules. Nous n'avons pas, dans cette leçon, à tenir compte de ces autres pertes.



**3° Remarque.** — La force électromotrice  $E$  est la somme des volts  $U$  qui se retrouvent entre les bornes du générateur (volts utiles) et de la chute de tension interne  $rI$  du générateur (volts perdus).

$E$  représente donc la *totalité des volts produits* par le générateur.

**4° Rôle de la force électromotrice.** — La force électromotrice est la cause initiale de la production de l'énergie et de la circulation du courant.

La force électromotrice et la résistance interne sont les deux caractéristiques électriques principales d'un générateur.

**5° Mesure de la force électromotrice.** — Dans la formule  $E = U + rI$  si l'on donne à  $I$  la valeur zéro on trouve :

$$E = U$$

Lorsqu'un générateur ne débite aucun courant sa différence de potentiel est égale à sa force électromotrice.

On peut donc connaître la force électromotrice d'un générateur en mesurant sa différence de potentiel à vide (quand il ne débite pas), le courant consommé par le voltmètre étant négligeable (fig. 87).

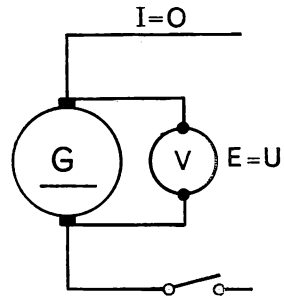


Fig. 87. — Mesure de la force électromotrice  $E$ .

## 97. Loi d'Ohm pour un générateur.

**1° La formule  $E = U + rI$  peut s'écrire :**

(23)

$$U = E - rI$$

$\left\{ \begin{array}{l} r \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \\ U \text{ et } E \text{ en volts} \end{array} \right.$

**2° Loi.** — La différence de potentiel entre les bornes d'un générateur est égale à sa force électromotrice diminuée du produit de sa résistance interne par l'intensité du courant qu'il débite.

**3°** Suivant les calculs à effectuer nous écrirons la formule 23 :

$$U = E - rI \quad E = U + rI \quad I = \frac{E - U}{r} \quad r = \frac{E - U}{I}$$

### 98. Vérification expérimentale.

Effectuons le montage de la figure 88. En déplaçant le curseur du rhéostat, faisons varier la charge sur laquelle le générateur (6 piles 1,5 V en série) débite et relevons les valeurs de  $I$  et de  $U$ .

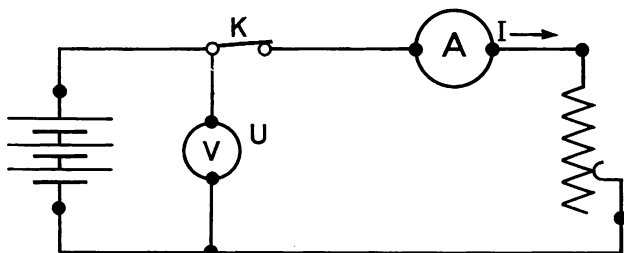


Fig. 88. — Quand le courant  $I$  augmente, la différence de potentiel  $U$  diminue.

Avec les résultats (voir tableau ci-dessous), traçons la courbe  $U = f(I)$  : c'est une droite ( $y = ax + b$ ) dont on peut déterminer graphiquement «  $a$  » et «  $b$  ».

On trouve  $a = -r$  et  $b = E$ .

$U$  est donc bien une fonction linéaire décroissante de  $I$  (fig. 89).

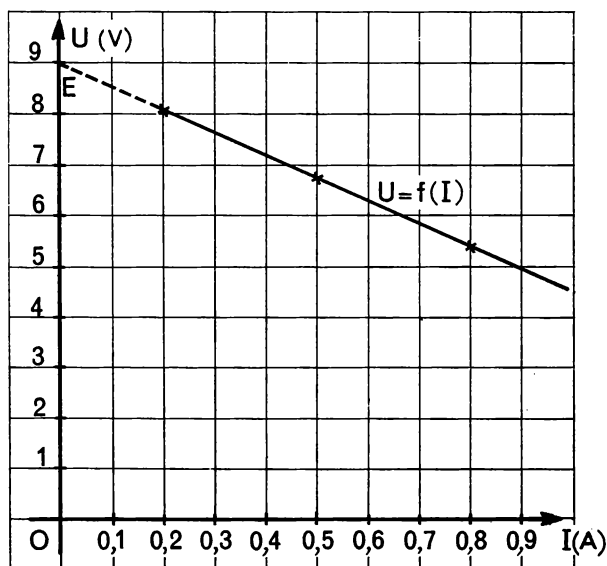


Fig. 89. — En prolongeant la droite on trouve  $b = 9 = E$  (quand  $I$  est nul), d'autre part le quotient  $a = \frac{5,4 - 8,1}{0,8 - 0,2} = \frac{-2,7}{0,6} = -4,5$  donne  $r = 4,5$ .

### 99. Générateur débitant sur une résistance pure.

1° Considérons le circuit de la figure 90. En négligeant la résistance des fils de liaison, nous avons deux façons de calculer la différence de potentiel entre A et B :

1° Loi d'Ohm pour la résistance R :

$$U = RI$$

2° Loi d'Ohm pour le générateur :

$$U = E - rI$$

Écrivons que ces deux valeurs de U sont égales :

$$RI = E - rI \quad RI + rI = E \quad (R + r)I = E$$

d'où

(24)

$$I = \frac{E}{R + r}$$

$\left\{ \begin{array}{l} E \text{ en volts} \\ R \text{ et } r \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \end{array} \right.$

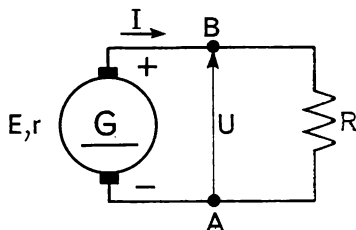


Fig. 90. — La différence de potentiel U est commune à R et à G.

2° **Remarque importante.** — Si plusieurs résistances sont montées entre les bornes du générateur, on les remplace par leur résistance équivalente et l'on peut appliquer la formule 24 avec  $R_e$  à la place de R :

(24 bis)

$$I = \frac{E}{R_e + r}$$

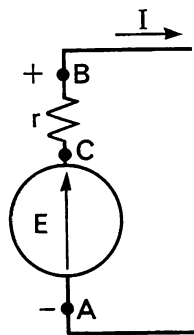


Fig. 91. — Schéma équivalent à un générateur.

### 100. Schéma équivalent à un générateur.

Il est possible, pour résoudre les problèmes, de séparer la résistance interne de la force électromotrice; un générateur se représente alors par un générateur parfait (sans résistance interne) en série avec une résistance pure (fig. 91).

Ce n'est là qu'une manière commode de voir les choses et il faut bien comprendre que, en réalité, le tout est inséparable. En particulier le point de séparation C n'existe pas dans le générateur dont les bornes sont A et B.

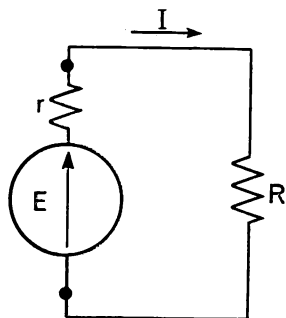


Fig. 92. — Pour les calculs,  $E$  débite le courant  $I$  sur  $r$  et  $R$  en série.

Remarquer que le vecteur qui représente la force électromotrice a son extrémité au pôle plus et indique du même coup le sens du courant.

Avec cette représentation on comprend mieux le sens des formules 24 et 24 bis. Le générateur parfait de force électromotrice  $E$  débite le courant  $I$  sur sa **résistance interne en série avec la résistance extérieure** ou le groupement de résistances extérieures (fig. 92).

### 101. Court-circuit d'un générateur.

Si l'on réunit les deux bornes d'un générateur par un fil gros et court, donc de résistance pratiquement nulle, le générateur est en court-circuit et débite sur sa seule résistance interne  $r$  un courant :

$$I_{cc} = \frac{E}{r}$$

C'est évidemment le courant maximal qu'il puisse débiter, sa différence de potentiel est alors nulle ainsi que la puissance utile qu'il fournit.

Par contre  $I_{cc}$  est en général énorme ainsi que la puissance,  $r I_{cc}^2$ , dissipée par effet joule dans le générateur.

Le court-circuit détériore toujours un générateur quand il ne le met pas définitivement hors d'usage.

### 102. Rendements d'un générateur.

**1° Rendement industriel.** — Il a été défini dans les deux premières leçons :

$$\eta_i = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance absorbée}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI}{P_a}$$

Rappelons que la puissance absorbée est égale à la somme de la puissance utile et des pertes totales.

**2° Rendement électrique.** — Si on ne tient compte que des pertes joules on peut définir un rendement électrique :

$$\eta_e = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance électrique totale}} = \frac{P_u}{P_{ET}}$$

Le rendement électrique est plus grand que le rendement industriel puisque :

$$P_{ET} < P_a$$

On peut écrire

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_{ET}} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}$$

$$\eta_e = \frac{U}{E}$$

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

**14. 01.** — Un générateur débite un courant de 11 A sous une différence de potentiel de 27,5 V. Sa force électromotrice est de 33 V. Calculer :

- 1° Sa résistance interne;
- 2° La différence de potentiel qu'il aurait s'il débitait sur une résistance de 5  $\Omega$ .

— SOLUTION —

$$1^\circ) \text{ Résistance interne : } r = \frac{E - U}{I} = \frac{33 - 27,5}{11} = \frac{5,5}{11} = 0,5 \, \Omega$$

$$2^\circ) \text{ Courant débité : } I = \frac{E}{R + r} = \frac{33}{5 + 0,5} = \frac{33}{5,5} = 6 \, \text{A}$$

$$\text{Différence de potentiel : } U = E - rI = 33 - 0,5 \times 6 = 33 - 3 = 30 \, \text{V}$$

$$\text{Vérification : } U = RI = 5 \times 6 = 30 \, \text{V.}$$

**14. 02.** — Entre les bornes d'un générateur de force électromotrice  $E = 120 \, \text{V}$  et de résistance  $r = 1,5 \, \Omega$  on monte en parallèle trois résistances :  $R_1 = 11 \, \Omega$ ,  $R_2 = 22 \, \Omega$ ,  $R_3 = 33 \, \Omega$ . Calculer :

- 1° La résistance équivalente aux trois résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ;
- 2° L'intensité du courant débité par le générateur;
- 3° La différence de potentiel entre les bornes du générateur;
- 4° L'intensité à travers chacune des trois résistances.

## — SOLUTION —

$$\begin{aligned}
 1^{\circ}) \text{ Résistance équivalente : } \frac{1}{R_e} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \\
 &= \frac{1}{11} + \frac{1}{22} + \frac{1}{33} = \frac{6}{66} + \frac{3}{66} + \frac{2}{66} = \frac{11}{66} \\
 R_e &= \frac{66}{11} = 6 \, \Omega
 \end{aligned}$$

$$2^{\circ}) \text{ Intensité du courant débité : } I = \frac{E}{R_e + r} = \frac{120}{6 + 1,5} = \frac{120}{7,5} = 16 \, \text{A}$$

$$3^{\circ}) \text{ Différence de potentiel : } U = E - rI = 120 - 1,5 \times 16 = 120 - 24 = 96 \, \text{V}$$

$$4^{\circ}) \text{ Courant dans chaque résistance : } I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{96}{11} \simeq 8,73 \, \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{96}{22} \simeq 4,36 \, \text{A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{96}{33} \simeq 2,91 \, \text{A}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Vérification : } I &= I_1 + I_2 + I_3 = 8,73 + 4,36 + 2,91 \\
 &= 16 \, \text{A}
 \end{aligned}$$

**14. 03.** — Une dynamo débite un courant  $I = 260 \, \text{A}$  sous une différence de potentiel  $U = 560 \, \text{V}$ . Sa résistance interne est  $r = 0,1 \, \Omega$  et son rendement industriel est  $\eta_i = 91 \, \%$ . Calculer :

1° La puissance utile de la dynamo;

2° Sa puissance absorbée;

3° Sa force électromotrice et sa puissance électrique totale;

4° Son rendement électrique.

## — SOLUTION —

$$1^{\circ}) \text{ Puissance utile : } P_u = UI = 560 \times 260 = 145\,600 \, \text{W}$$

$$2^{\circ}) \text{ Puissance absorbée : } P_a = \frac{P_u}{\eta_i} = \frac{145\,600}{0,91} = 160\,000 \, \text{W}$$

$$3^{\circ}) \text{ Force électromotrice : } E = U + rI = 560 + 0,1 \times 260 = 560 + 26 = 586 \, \text{V}$$

$$\text{Puissance électrique totale : } P_{ET} = EI = 586 \times 260 = 152\,360 \, \text{W}$$

$$4^{\circ}) \text{ Rendement électrique : } \eta_e = \frac{P_u}{P_{ET}} = \frac{U}{E} = \frac{560}{586} = 95,6 \, \%$$

## II. AVEC RÉPONSES.

**14. 04.** — La différence de potentiel d'un générateur est  $U_1 = 10$  V quand il débite  $I_1 = 5$  A et  $U_2 = 8,8$  V quand il débite  $I_2 = 8$  A. Calculer sa force électromotrice et sa résistance interne.

Réponses :  $E = 12$  V     $r = 0,4 \Omega$ .

**14. 05.** — Un générateur absorbe une puissance de 4 kW quand il débite un courant de 25 A sous une différence de potentiel de 130 V. Sa résistance interne est  $r = 0,3 \Omega$ . Calculer :

- 1° Les pertes joules;
- 2° La puissance utile;
- 3° Les rendements industriel et électrique du générateur.

Réponses : 187,5 W ; 3 250 W ; 81,2 % ; 94,5 %.

## III. A RÉSOUDRE.

**14. 06.** — 1° Calculer les courants de court-circuit des générateurs suivants :

- |                 |             |                   |
|-----------------|-------------|-------------------|
| a) Pile         | $E = 1,5$ V | $r = 0,5 \Omega$  |
| b) Accumulateur | $E = 2$ V   | $r = 0,01 \Omega$ |
| c) Dynamo       | $E = 120$ V | $r = 0,4 \Omega$  |

2° Quelles sont les pertes joules correspondantes?

**14. 07.** — Un générateur alimente sous une différence de potentiel de 120 V dix lampes de 60 W, 120 V, montées en parallèle. Calculer :

- 1° Le courant débité et la puissance utile;
- 2° La force électromotrice du générateur sachant que sa résistance interne  $r$  est  $2 \Omega$ .

**14. 08.** — Une pile de lampe de poche de 4,5 V de force électromotrice fournit à une ampoule un courant de 0,2 A sous une différence de potentiel de 3,5 V. Calculer :

- 1° La résistance interne de la pile;
- 2° La puissance utile et la puissance perdue par effet joule à l'intérieur de la pile.

**14. 09.** — Un générateur de force électromotrice  $E = 24$  V et de résistance interne  $0,6 \Omega$  alimente un groupement de deux résistances  $R_1 = 6 \Omega$  et  $R_2 = 4 \Omega$  en parallèle. Calculer :

- 1° La résistance équivalente à  $R_1$  et  $R_2$ ;
- 2° L'intensité du courant débité par le générateur;
- 3° La différence de potentiel entre les bornes de  $R_1$  et  $R_2$  et le courant dans chacune d'elles.

14. 10. — La force électromotrice d'un générateur est de 120 V, sa résistance interne 2,5  $\Omega$ . Calculer le courant qu'il débite quand on monte entre ses bornes successivement chacune des résistances suivantes : 57,5; 37,5; 10; 0,5 ; 0 (en  $\Omega$ ). Calculer dans chaque cas la différence de potentiel et la puissance utile. Tracer la courbe de la puissance utile en fonction de la résistance de charge. Pour qu'elle résistance cette puissance est-elle maximale? (Solution graphique.)



## ASSOCIATION DE GÉNÉRATEURS

### 103. But et réalisation.

1<sup>o</sup> **But.** — Soit obtenir une force électromotrice plus élevée que celle d'un seul générateur.

Soit obtenir dans le circuit d'utilisation un courant plus intense que celui que pourrait fournir un seul générateur.

Soit les deux à la fois.

2<sup>o</sup> **Réalisation.** — Il existe trois modes de couplage : en série, en parallèle et mixte (c'est-à-dire une combinaison des deux précédents).

a) *En série.* — Pratiquement on ne couple en série que des générateurs identiques. Ce mode de couplage est utilisé couramment pour les piles et les accumulateurs, très rarement pour les dynamos.

b) *En parallèle.* — On monte en parallèle des piles identiques, en particulier de même force électromotrice.

Le couplage parallèle d'accumulateurs est à éviter à cause de leur faible résistance interne (Voir problème 17.04, chap. 17).

Les dynamos peuvent être montées en parallèle même si elles sont différentes. Les problèmes qui sont alors posés sortent du cadre de ce livre.

### 104. Générateurs en série.

1<sup>o</sup> **Montage** (fig. 93). — Le pôle + d'un générateur est relié au pôle — du suivant.

Nous ne traiterons ici que le cas de générateurs identiques.

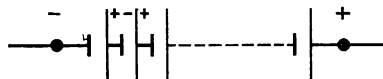


Fig. 93. — Générateurs en série.

2<sup>o</sup> **Lois.** — a) *Courant.* — Le courant débité est commun :

$$I \text{ commun} = i \text{ d'un générateur}$$

b) *Force électromotrice.* — On sait que dans un montage série les différences de potentiel s'ajoutent, il en est de même des forces électromotrices.

S'il y a  $n$  générateurs de force électromotrice  $e$  en série, la force électromotrice totale est :

$$E = ne$$

c) *Résistance.* — La résistance interne est égale à la somme des résistances internes  $r$  :

$$R = nr$$

d) *Remarque.* — Les générateurs ayant même résistance interne et débitant le même courant ont la même chute de tension, leurs forces électromotrices étant égales, leurs différences de potentiel  $u$  le sont aussi et la différence de potentiel totale est :

$$U = nu = n(e - rI)$$

3° **Générateur équivalent.** — On peut donc remplacer l'ensemble des générateurs par un seul ayant pour caractéristiques

$$E = ne \quad R = nr$$

et débitant un courant  $I = i$ .

### 105. Générateurs en parallèle.

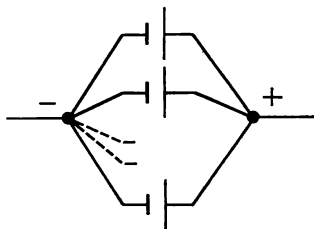


Fig. 94. — Générateurs en parallèle.

1° **Montage** (fig. 94). — Les pôles + sont réunis entre eux, les pôles — sont aussi réunis entre eux.

Nous ne traiterons ici que le cas de générateurs identiques.

2° **Lois.** — a) *Force électromotrice.* — La force électromotrice  $E$  du groupement est égale à celle  $e$  d'un générateur :

$$E = e$$

b) *Courant.* — Le courant  $I$  débité par l'ensemble est égal à la somme des courants  $i$  débités par chaque générateur, comme ils sont tous identiques si  $n$  est leur nombre :

$$I = ni$$

c) **Résistance.** — Les résistances internes sont en parallèle, on a donc comme au § 90 du chapitre 13 :

$$R = \frac{r}{n}$$

$r$  étant la résistance d'un générateur et  $R$  celle du groupement.

d) **Remarque.** — La différence de potentiel est évidemment commune :

$$U = u = e - ri$$

3° **Générateur équivalent.** — Ses caractéristiques sont :

$$E = e \quad R = \frac{r}{n}$$

Le courant qu'il débite est  $I = ni$ .

### 106. Choix du couplage.

1° Si l'on désire une grande tension et un courant faible on utilise le montage série.

Si l'on désire un fort courant sous une différence de potentiel peu importante on utilise le montage parallèle.

Si l'on désire à la fois une grande tension et un fort courant on réalise une combinaison des deux montages : le montage mixte.

2° **Couplage mixte.** — On réunit en parallèle  $p$  séries comprenant chacune  $s$  générateurs (fig. 95). Le nombre total de générateurs est

$$n = p \times s$$

a) Générateur équivalent à une série :

$$E' = se \quad R' = sr \quad I' = i$$

b) Générateur équivalent à  $p$  séries en parallèle :

$$E = E' \quad R = \frac{R'}{p} \quad I = pI'$$

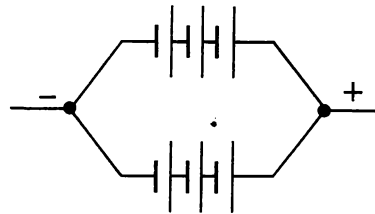


Fig. 95. — Groupement mixte. Deux séries de trois générateurs sont en parallèle.

Finalement :  $E = se$  ,  $R = \frac{s}{p} r$   $I = pi$ .

3° Pour tirer la puissance maximale d'un groupement il faut satisfaire aux conditions précisées dans le paragraphe suivant.

### 107. Puissance utile d'un générateur.

1° On sait que la puissance utile est  $P_u = UI$ .

Remplaçons  $U$  par son expression (formule 23).

$$\begin{aligned} P_u &= (E - rI) I \\ &= -rI^2 + EI \end{aligned}$$

$E$  et  $r$  étant constants,  $P_u$  est une fonction du second degré de  $I$  dont le coefficient  $a = -r$  est négatif. Cette fonction a donc un **maximum** pour :

$$x = I = -\frac{b}{2a} = \frac{E}{2r}$$

Le maximum est  $P_m = -r \left( \frac{E}{2r} \right)^2 + E \frac{E}{2r}$

$$P_m = \frac{E^2}{4r}$$

La différence de potentiel est alors :  $U = E - ri = E - r \frac{E}{2r}$

$$U = \frac{E}{2}$$

Le rendement électrique est :  $\eta_e = \frac{U}{E} = \frac{1}{2} = 50 \%$

2° **Conclusion.** — Un générateur fournit au maximum une puissance égale à  $\frac{E^2}{4r}$ , son rendement est alors de 50 %.

3° **Exercice.** — Tracer les courbes  $P_u = f(I)$  et  $\eta_e = f(I)$ .

Cet exercice est résolu sous forme numérique au problème 15. 03.

4° **Remarque.** — Quand le générateur fournit sa puissance maximale  $U = \frac{E}{2}$ , la chute interne de tension est donc aussi égale à  $\frac{E}{2}$ . Si

le débit a lieu sur résistance pure on a :  $\frac{E}{2} = U = RI = rI$

d'où

$$R = r$$

Un générateur fournit son maximum de puissance quand il débite sur une résistance égale à sa résistance interne.

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

**15. 01.** — Une batterie d'accumulateurs de secours comporte en série 65 éléments de 2 V de force électromotrice. La résistance interne d'un élément est 0,01  $\Omega$ . Calculer :

1° La différence de potentiel de la batterie quand on lui fait débiter 50 A. Quelle est alors la résistance équivalente des récepteurs montés entre ses bornes?

2° L'intensité du courant et la différence de potentiel quand on branche la batterie sur une résistance  $R'$  de 2,6  $\Omega$ .

— SOLUTION —

1°) Générateur équivalent :

$$E = ne = 65 \times 2 = 130 \text{ V}$$

$$R = nr = 65 \times 0,01 = 0,65 \text{ } \Omega$$

Différence de potentiel :

$$\begin{aligned} U &= E - RI \\ &= 130 - 50 \times 0,65 = 97,5 \text{ V} \end{aligned}$$

Résistance équivalente :

$$R_e = \frac{U}{I} = \frac{97,5}{50} = 1,95 \text{ } \Omega$$

2°) Intensité :

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R' + R} = \frac{130}{2,6 + 0,65} = \frac{130}{3,25} \\ &= 40 \text{ A} \end{aligned}$$

Différence de potentiel :

$$\begin{aligned} U &= E - RI = 130 - 0,65 \times 40 \\ &= 104 \text{ V} \end{aligned}$$

*N. B.* —  $R$  représentant la résistance du générateur équivalent, l'écriture de la formule 24 est légèrement modifiée.

15. 02. — On dispose de 48 piles de force électromotrice  $e = 1,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 0,5 \Omega$ . On veut alimenter une résistance  $R' = 1,5 \Omega$ . Calculer l'intensité du courant dans la résistance, la différence de potentiel entre ses bornes et la puissance qui lui est fournie quand on l'alimente :

1° Avec une seule pile;

2° Avec toutes les piles en série;

3° Avec toutes les piles en parallèle;

4° Avec un groupement mixte comportant en parallèle 4 séries de 12 piles.

— SOLUTION ABRÉGÉE —

$$1^\circ) \quad I = \frac{e}{r + R'} = \frac{1,5}{0,5 + 1,5} = 0,75 \text{ A}$$

$$U = R'I = 1,5 \times 0,75 = 1,125 \text{ V}$$

$$P = UI = 1,125 \times 0,75 = 0,844 \text{ W}$$

$$2^\circ) \quad E = ne = 48 \times 1,5 = 72 \text{ V}$$

$$R = nr = 48 \times 0,5 = 24 \Omega$$

$$I = \frac{E}{R + R'} = \frac{72}{24 + 1,5} = \frac{72}{25,5} = 2,82 \text{ A}$$

$$U = 1,5 \times 2,82 = 4,23 \text{ V}$$

$$P = 4,23 \times 2,82 = 11,9 \text{ W}$$

$$3^\circ) \quad E = e = 1,5 \text{ V}$$

$$R = \frac{r}{n} = \frac{0,5}{48} = 0,0104 \Omega$$

$$I = \frac{E}{R + R'} = \frac{1,5}{1,5 + 0,0104} = 0,993 \text{ A}$$

$$U = 1,5 \times 0,993 = 1,49 \text{ V}$$

$$P = 1,49 \times 0,993 = 1,48 \text{ W}$$

$$4^\circ) \quad E = se = 12 \times 1,5 = 18 \text{ V}$$

$$R = \frac{sr}{p} = \frac{12 \times 0,5}{4} = 1,5 \Omega$$

$$I = \frac{E}{R' + R} = \frac{18}{1,5 + 1,5} = 6 \text{ A}$$

$$U = 6 \times 1,5 = 9 \text{ V}$$

$$P = 9 \times 6 = 54 \text{ W}$$

15. 03. — Un générateur a une force électromotrice  $E = 120 \text{ V}$  et une résistance interne  $r = 2 \Omega$ . Exprimer, en fonction de  $I$ , sa différence de potentiel, sa puissance utile et son rendement électrique. Tracer les courbes correspondantes.

Pour quelle valeur de  $I$  la puissance est-elle maximale?

## — SOLUTION —

Expression de  $U$  (courbe fig. 96) :

$$\begin{aligned} U &= E - rI \\ &= 120 - 2I \end{aligned}$$

Remarque :  $U = 0$  pour  $I = I_{cc} = 60$  A

Expression de  $P_u$ . Courbe fig. 97.

$$\begin{aligned} P_u &= UI = (E - rI) I \\ &= EI - rI^2 \\ &= 120I - 2I^2 \end{aligned}$$

Expression de  $\eta_e$  : Courbe fig. 98.

$$\begin{aligned} \eta_e &= \frac{U}{E} = \frac{E - rI}{E} = \frac{120 - 2I}{120} \\ &= 1 - \frac{I}{60} \end{aligned}$$

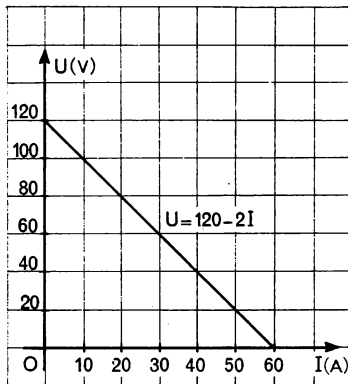


Fig. 96.

La puissance est maximale pour :

$$I = \frac{E}{2r} = \frac{120}{4} = 30 \text{ A}$$

On a alors :

$$\begin{aligned} U &= 120 - 2 \times 30 = 60 \text{ V} \\ P_m &= 60 \times 30 = 1800 \text{ W} \\ \eta_e &= \frac{60}{120} = 0,5 \text{ soit } 50\% \end{aligned}$$

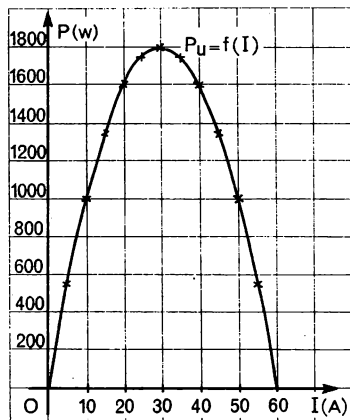


Fig. 97.

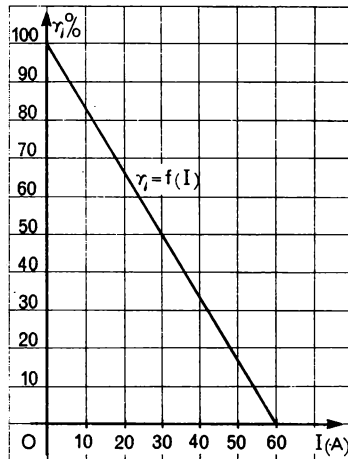


Fig. 98.

## II. AVEC RÉPONSES.

**15. 04.** — Une batterie d'accumulateurs comporte 10 éléments en série ayant chacun une force électromotrice  $e = 1,5 \text{ V}$  et une résistance interne  $r = 0,01 \Omega$ .

1° Calculer le générateur équivalent;

2° Pour quelle résistance externe la puissance utile sera-t-elle maximale?

3° On fait débiter à la batterie un courant tel que son rendement soit de 80 %. Calculer ce courant et la puissance utile.

$$\text{Réponses : } \quad E = 15 \text{ V} \quad R = 0,1 \Omega \quad R' = 0,1 \Omega \\ I = 30 \text{ A} \quad P_u = 360 \text{ W}$$

**15. 05.** — On dispose de 12 piles de force électromotrice  $e = 1,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 0,6 \Omega$ . Calculer le générateur équivalent à chacun des montages possibles :

$$\begin{array}{llll} p = 1 & s = 12; & p = 2 & s = 6; & p = 3 & s = 4 \\ p = 4 & s = 3; & p = 6 & s = 2; & p = 12 & s = 1 \end{array}$$

Quel montage faut-il utiliser pour obtenir la puissance utile maximale quand l'ensemble débite :

a) Sur une résistance de  $1,8 \Omega$ ?

b) Sur une résistance de  $0,8 \Omega$ ?

Calculer dans chaque cas l'intensité du courant, la différence de potentiel et la puissance utile.

$$\text{Réponses : } a) \quad p = 2 \quad s = 6; \quad 2,5 \text{ A}; \quad 4,5 \text{ V}; \quad 11,25 \text{ W}.$$

## III. A RÉSOUDRE.

**15. 06.** — On dispose de 18 piles de force électromotrice  $e = 1,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $r = 1 \Omega$ . Calculer l'intensité du courant débité dans une résistance  $R' = 1 \Omega$ , la différence de potentiel entre les bornes de cette résistance et la puissance qui lui est fournie :

1° Si on groupe en parallèle 3 séries de 6 piles;

2° Si on groupe en parallèle 6 séries de 3 piles.

**15. 07.** — Une batterie d'accumulateurs comporte 100 éléments de force électromotrice  $1,3 \text{ V}$  chacun en série. La résistance de chaque élément est  $0,2 \Omega$ . On monte entre les bornes de cette batterie :

1° Une résistance de  $60 \Omega$ ;

2° Trois résistances de  $60 \Omega$  en parallèle.

Calculer dans chaque cas la différence de potentiel entre les bornes de la batterie et la puissance utile fournie.

**15. 08.** — On monte en série 12 piles de force électromotrice  $e = 1,5 \text{ V}$  et de résistance interne  $0,5 \Omega$ . Calculer le courant débité par cette batterie sur une résistance de  $18 \Omega$ . Quelle est la différence de potentiel totale et celle de chaque pile?



**15. 09.** — Une batterie de piles comporte en parallèle 6 séries de 24 piles. La force électromotrice d'une pile est  $e = 1,5 \text{ V}$  et sa résistance interne  $r = 0,4 \text{ } \Omega$ . Calculer :

1° La résistance de charge  $R'$  pour laquelle la batterie fournit sa puissance maximale;

2° La résistance  $R''$  pour laquelle la puissance fournie est moitié de la précédente.

**15. 10.** — Une pile de  $1,5 \text{ V}$  de force électromotrice et de  $0,5 \text{ } \Omega$  de résistance interne alimente une résistance  $R' = 2 \text{ } \Omega$ .

1° Calculer l'intensité du courant, la différence de potentiel et la puissance fournie;

2° On monte 10 piles en parallèle sur la même résistance  $R'$ , l'intensité est-elle multipliée par 10?

3° Sur quelle résistance faut-il utiliser la batterie pour que le courant soit dix fois celui du 1°?

---

## RÉCEPTEURS

### 108. *Définition.*

Un récepteur est un appareil qui absorbe de l'énergie électrique et restitue de l'énergie sous une forme quelconque (sauf électrique).

On peut évidemment parler de puissances au lieu d'énergies (fig. 99).

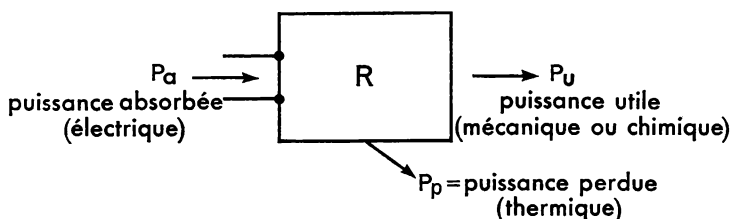


Fig. 99.

### 109. *Récepteurs usuels.*

Les récepteurs usuels à courant continu sont :

- Les récepteurs thermiques déjà étudiés;
- Les accumulateurs en charge et les cuves d'électrolyse qui transforment l'énergie électrique en énergie chimique;
- Les moteurs qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

Les lois applicables aux récepteurs thermiques étant déjà connues, l'objet de cette leçon est l'étude des lois applicables aux autres récepteurs.

### 110. *Puissances électriques mises en jeu dans un récepteur.*

**1<sup>o</sup> Puissance absorbée ( $P_a$ ).** — C'est la puissance absorbée par le récepteur sur le réseau qui l'alimente. Elle est purement électrique.

Nous savons la calculer (§ 52, chap. 7), si  $U$  est la différence de potentiel appliquée au récepteur et  $I$  le courant qu'il absorbe :

$$P_a = UI$$

**2° Puissance perdue ( $P_j$ ).** — C'est la puissance perdue par effet joule à l'intérieur du récepteur, elle est donnée par la loi de Joule, si  $r'$  est la résistance interne du récepteur :

$$P_j = r'I^2$$

**3° Puissance électrique utile.** — Le récepteur reçoit :

$$P_a = UI$$

et dissipe dans sa propre résistance :

$$P_j = r'I^2$$

La différence de ces deux puissances est *seule* transformée en une autre forme d'énergie (chimique ou mécanique) cette différence est la *puissance électrique utile* <sup>(1)</sup>.

$$\begin{aligned} \text{Soit :} \quad P_{EU} &= P_a - P_j \\ P_{EU} &= UI - r'I^2 \end{aligned}$$

### 111. Force contre-électromotrice.

1° Divisons par  $I$  les deux membres de la relation ci-dessus :

$$\frac{P_{EU}}{I} = U - r'I$$

Le quotient  $\frac{P_{EU}}{I}$  se mesure en volts puisque c'est une différence de volts. Nous le représenterons par la lettre  $E'$  et nous l'appellerons **force contre-électromotrice** du récepteur (en abrégé **f. e. é. m.**) :

$$E' = \frac{P_{EU}}{I}$$

On peut donc écrire :

$$E' = U - r'I$$

**2° DÉFINITION.** — La **force contre-électromotrice** d'un récepteur est le quotient de sa puissance électrique utile par l'intensité du courant qu'il absorbe.

---

(1) La puissance réellement utile est égale à la puissance électrique utile diminuée des pertes autres que les pertes joules. Nous n'avons pas dans cette leçon à tenir compte de ces autres pertes.

3° **Remarque.** — La force contre-électromotrice  $E'$  est la différence des volts  $U$  qui sont appliqués au récepteur (volts absorbés) et de la chute de tension interne  $r'I$  du récepteur (volts perdus).

$E'$  représente donc les volts utiles du récepteur, ceux qui vont effectivement participer à la transformation de l'énergie.

4° **Rôle de la force contre-électromotrice.** — La force contre-électromotrice est à l'origine de la transformation d'énergie électrique en une autre forme d'énergie (sauf thermique).

La force contre-électromotrice et la résistance interne sont les deux caractéristiques électriques principales d'un récepteur.

5° **Mesure de la force contre-électromotrice.** — Elle sera précisée lors de l'étude détaillée des récepteurs. On peut déjà remarquer que si

$$I = 0 \quad \text{on a} \quad E' = U$$

## 112. Loi d'Ohm pour un récepteur.

1° La formule  $E' = U - r'I$  peut s'écrire :

$$(25) \quad \boxed{U = E' + r'I} \quad \left\{ \begin{array}{l} r \text{ en ohms} \\ I \text{ en ampères} \\ U \text{ et } E' \text{ en volts} \end{array} \right.$$

2° **Loi.** — La différence de potentiel entre les bornes d'un récepteur est égale à sa force contre-électromotrice augmentée du produit de sa résistance interne par l'intensité du courant qu'il absorbe.

3° Suivant les calculs à effectuer nous écrirons la formule 25 :

$$U = E' + r'I \quad E' = U - r'I \quad I = \frac{U - E'}{r'} \quad r' = \frac{U - E'}{I}$$

## 113. Vérification expérimentale.

Effectuons le montage de la figure 100. En déplaçant le curseur du rhéostat, faisons varier la tension appliquée au récepteur et relevons sa valeur  $U$  et celle de  $I$ .

Avec les résultats (voir le tableau ci-dessous), traçons la courbe  $U = f(I)$  : c'est une droite ( $y = ax + b$ ) dont on peut déterminer graphiquement « a » et « b ». On trouve :

$$a = r'$$

$$b = E'$$

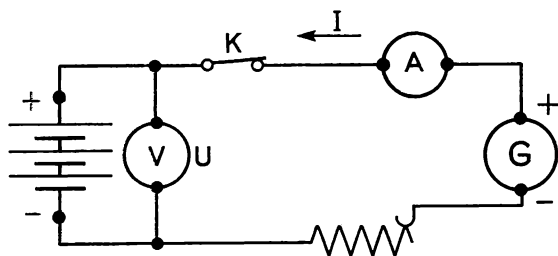


Fig. 100. — En faisant varier le courant grâce au rhéostat on peut relever les valeurs qui permettront de tracer la courbe  $U = f(I)$ .

TABLEAU

| I (A) | U (v) |
|-------|-------|
| 2     | 4,8   |
| 5     | 5,7   |
| 8     | 6,6   |

$U$  est donc bien une fonction linéaire croissante de  $I$  (fig. 101).

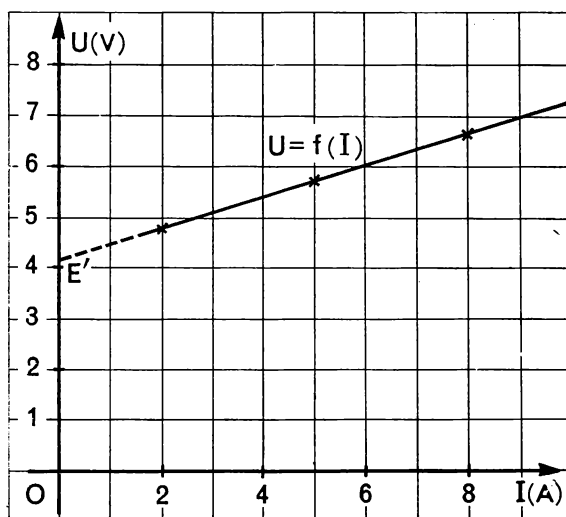


Fig. 101. — En prolongeant la droite, on trouve  $b = E' = 4,2 \text{ V}$  (quand  $I$  est nul), d'autre part le quotient  $a = \frac{5,7 - 4,8}{5 - 2} = \frac{0,9}{3} = 0,3$  donne  $r' = 0,3 \Omega$ .

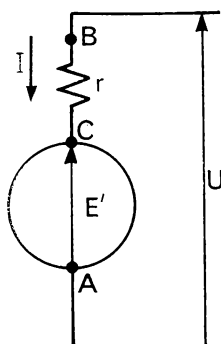


Fig. 102. — Pour les problèmes, on peut séparer la résistance interne de la force contre-électromotrice.

#### 114. Schéma équivalent à un récepteur.

Il est possible, pour résoudre les problèmes, de séparer la résistance interne de la force contre-électromotrice; un récepteur se représente alors par un récepteur théorique (sans résistance interne) en série avec une résistance pure (fig. 102).

Ce n'est là qu'une manière commode de voir les choses et il faut bien comprendre que, en réalité, le tout est inséparable. En particulier le point de séparation C n'existe pas dans le récepteur dont les bornes sont A et B.

Remarquer que le vecteur qui représente la force contre-électromotrice a son extrémité au pôle plus; il est donc de sens opposé à celui du courant. Ainsi se justifie la préposition **contre** placée devant électromotrice.

#### 115. Générateur ou récepteur?

**1<sup>o</sup> Générateurs en opposition.** — Un générateur est monté en opposition dans un circuit quand le courant le traverse du pôle + vers le pôle —. Il fonctionne alors comme un récepteur et sa force électromotrice doit être considérée comme une force contre-électromotrice.

**2<sup>o</sup> Appareils réversibles.** — Si un appareil peut fonctionner en générateur et en récepteur, comme c'est le cas des accumulateurs et des dynamos (ou moteurs), son mode de fonctionnement dépend des autres éléments du circuit. On ne peut donc *a priori* préciser s'il développe une force électromotrice ou une force contre-électromotrice.

C'est pourquoi on peut aussi bien employer le terme « force électromotrice » pour un générateur et pour un récepteur. Cependant nous ferons la distinction chaque fois que c'est possible.

**3<sup>o</sup> Remarque.** — Si l'on connaît la différence de potentiel et la force électromotrice d'un appareil on sait immédiatement s'il fonctionne en générateur ou en récepteur grâce aux deux lois :

$$\text{formule 23 : } U = E - rI$$

$$\text{formule 25 : } U = E' + r'I$$

Si  $U < E$  c'est un générateur; Si  $U > E$  c'est un récepteur.  
(Exemple fig. 103.)

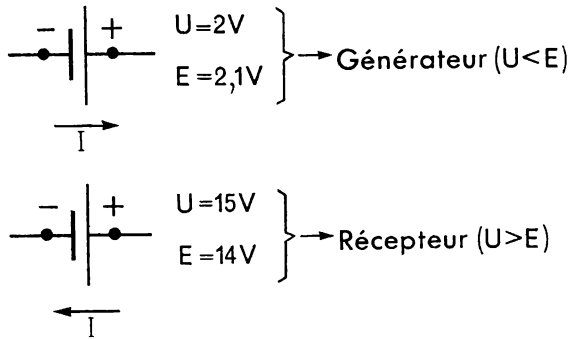


Fig. 103.

### 116. Rendements d'un récepteur.

**1° Rendement industriel.** — Il a été défini dans les deux premières leçons :

$$\eta_i = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance absorbée}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{UI}$$

Rappelons que la puissance absorbée est égale à la somme de la puissance utile et des pertes totales.

**2° Rendement électrique.** — Si on ne tient compte que des pertes joules on peut définir un rendement électrique :

$$\eta_e = \frac{\text{puissance électrique utile}}{\text{puissance absorbée}} = \frac{P_{eu}}{P_a}$$

Le rendement électrique est plus grand que le rendement industriel puisque :

$$P_{eu} > P_u$$

On peut écrire :

$$\eta_e = \frac{P_{eu}}{P_a} = \frac{E'I}{UI} = \frac{E'}{U}$$

$$\eta_e = \frac{E'}{U}$$

### 117. Association de récepteurs.

1° **En série.** — C'est un montage assez rare qui n'est employé qu'au laboratoire et pour les récepteurs chimiques.

a) *Au laboratoire.* — Le plus souvent un seul récepteur à force contre-électromotrice est monté en série avec des résistances pures. Ce cas est résolu dans le chapitre 17.

b) *Récepteurs chimiques.* — On monte en série des accumulateurs pour les recharger et, dans l'industrie électrochimique, des cuves d'électrolyse.

c) *Lois.* — Le récepteur équivalent a pour force contre-électromotrice : la somme des forces contre-électromotrices :

$$E' = e'_1 + e'_2 + e'_3 + \dots$$

et pour résistance interne : la somme des résistances internes :

$$R' = r'_1 + r'_2 + r'_3$$

La loi d'Ohm pour un récepteur s'applique ensuite au récepteur équivalent :

$$U = E' + R'I$$

le courant  $I$  étant le courant commun du montage série.

2° **En parallèle.** — La distribution de l'énergie se fait sous tension constante  $U$ , chaque récepteur est donc soumis à cette tension et le calcul du courant individuel s'effectue comme si le récepteur était seul.

Rappelons que le courant total est égal à la somme des courants.

## **PROBLÈMES**

### I. AVEC SOLUTION.

16. 01. — La force contre-électromotrice d'un récepteur est de 80 V et sa résistance interne 1,5  $\Omega$ .

1° Calculer le courant qui le traverse quand on lui applique une différence de potentiel de 110 V ;

2° Quelle est la différence de potentiel à appliquer pour avoir un courant de 12 A ?



## — SOLUTION —

1°) Intensité du courant :

$$I = \frac{U - E'}{r'} = \frac{110 - 80}{1,5} = 20 \text{ A}$$

2°) Différence de potentiel :

$$U = E' + r'I = 80 + 12 \times 1,5 = 98 \text{ V}$$

**16. 02.** — Un moteur absorbe un courant de 25 A sous une différence de potentiel de 120 V. Sa résistance interne est de 0,4  $\Omega$  et son rendement industriel est  $\eta_i = 82\%$ . Calculer :

- 1° La puissance absorbée, la puissance utile et les pertes joules;  
 2° La force contre-électromotrice et la puissance électrique utile;  
 3° Le rendement électrique;  
 4° Les pertes totales et les pertes autres que les pertes joules.

## — SOLUTION ABRÉGÉE —

$$\begin{aligned} 1^\circ) \quad P_a &= UI = 120 \times 25 = 3\,000 \text{ W} \\ P_u &= \eta_i \times P_a = 0,82 \times 3\,000 = 2\,460 \text{ W} \\ P_j &= r'I^2 = 0,4 \times 25 \times 25 = 250 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2^\circ) \quad E' &= U - r'I = 120 - 0,4 \times 25 = 110 \text{ V} \\ P_{eu} &= E'I = 110 \times 25 = 2\,750 \text{ W} \end{aligned}$$

$$3^\circ) \quad \eta_e = \frac{E'}{U} = \frac{110}{120} = 0,916 \text{ soit } 91,6\%$$

$$\begin{aligned} 4^\circ) \quad P_p &= \text{pertes totales} = P_a - P_u = 3\,000 - 2\,460 = 540 \text{ W} \\ \text{autres pertes} &= P_p - P_j = 540 - 250 = 290 \text{ W.} \end{aligned}$$

**16. 03.** — Une cuve d'électrolyse absorbe 40 A sous une différence de potentiel de 2,8 V. Lorsque le courant n'est plus que 15 A la différence de potentiel est 1,8 V. Calculer la résistance interne de la cuve et sa force contre-électromotrice.

## — SOLUTION —

Nous appliquons la loi d'Ohm avec les deux couples de valeurs.

$$U = E' + r'I$$

$$\begin{cases} 2,8 = E' + 40 r' & (1) \\ 1,8 = E' + 15 r' & (2) \end{cases}$$

Nous obtenons un système de deux équations du premier degré à deux inconnues  $E'$  et  $r'$ .

Par différence  $1 = 25 r'$

$$r' = \frac{1}{25} = 0,04 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{En portant dans (1)} \quad 2,8 &= E' + 40 \times 0,04 \\ E' &= 1,2 \, \text{V} \end{aligned}$$

Vérifions avec (2) :

$$U = E' + 15 r' = 1,2 + 15 \times 0,04 = 1,8 \, \text{V}$$

## II. AVEC RÉPONSES.

**16. 04.** — Un moteur de 8 ch. (puissance utile) absorbe un courant de 35 A sous une différence de potentiel de 220 V. Sa résistance interne est  $r' = 0,4 \, \Omega$ . Calculer :

1° Le rendement industriel du moteur; 2° Son rendement électrique.

Réponses : 76,5 % ÷ 93,6 %.

**16. 05.** — Un accumulateur a une force contre-électromotrice de 1,8 V au début de la charge et de 2,3 V à la fin. Sa résistance interne est  $r' = 0,01 \, \Omega$ . Pour recharger avec un courant constant de 8 A une batterie de 60 accumulateurs quelle tension faut-il appliquer à la batterie.

1° Au début de la charge? 2° A la fin?

Réponses : 112,8 V ÷ 142,8 V.

## III. A RÉSOUDRE.

**16. 06.** — Une cuve d'électrolyse a une force contre-électromotrice de 1,6 V et une résistance interne de 0,1  $\Omega$ . Calculer :

1° Le courant qui la traverse quand on lui applique une différence de potentiel de 2 V?

2° La tension qu'il faut lui appliquer pour que le courant soit de 15 A?

**16. 07.** — Un moteur de résistance interne 0,8  $\Omega$  absorbe un courant de 15 A sous une différence de potentiel de 120 V. Calculer :

1° La force contre-électromotrice du moteur;

2° Sa puissance absorbée et sa puissance électrique utile;

3° Son rendement électrique.

**16. 08.** — Un moteur absorbe un courant de 40 A sous une différence de potentiel de 220 V. Son rendement industriel est de 85 % et les pertes autres que les pertes joules sont de 760 W. Calculer :

- 1° La puissance absorbée, la puissance utile et les pertes totales;
- 2° Les pertes joules et la résistance interne;
- 3° La force contre-électromotrice du moteur.

**16. 09.** — On monte en parallèle sous une tension commune  $U = 220$  V, un moteur de force contre-électromotrice  $E' = 196$  V et de résistance interne  $r' = 1,2 \Omega$  et un radiateur de 2 750 W. Calculer :

- 1° Le courant absorbé par chaque appareil;
- 2° Le courant total;
- 3° La puissance totale consommée.

**16. 10.** — Un moteur a une force contre-électromotrice  $E' = 100$  V et une résistance interne  $r' = 0,6 \Omega$ .

Quelle tension faut-il lui appliquer pour qu'il soit traversé successivement par les courants suivants :

$$10 \text{ A} \div 20 \text{ A} \div 30 \text{ A} ?$$

Tracer la courbe  $U = f(I)$  et déterminer graphiquement le courant absorbé quand  $U = 117$  V.

---

## LOI D'OHM POUR UN CIRCUIT FERMÉ

### 118. Rappels.

1<sup>o</sup> Nous connaissons les lois d'Ohm s'appliquant à des appareils isolés :

a) Résistance pure : formule (13) :

$$U = RI$$

b) Générateur : formule (23) :

$$U = E - rI$$

c) Récepteur : formule (25) :

$$U = E' + r'I$$

On peut remarquer que la formule (13) est un cas particulier de la formule (25) avec  $E' = 0$ .

2<sup>o</sup> Nous connaissons la loi d'Ohm applicable à un circuit ne comportant qu'un générateur et une résistance pure (chap. 14, § 99) :

$$\text{formule (24)} \quad I = \frac{E}{R + r} \quad \text{ou} \quad E = (R + r) I$$

### 119. Circuit comportant un générateur et un récepteur.

1<sup>o</sup> **Montage.** — Le pôle positif du récepteur doit être relié au pôle positif du générateur (fig. 104). La force contre-électromotrice du récepteur s'oppose donc au passage du courant.

**2° Formule.** — Calculons la différence de potentiel entre les bornes communes A et B en appliquant d'abord la loi d'Ohm relative à un générateur puis la loi d'Ohm relative à un récepteur :

pour le générateur  $U = E - rI$   
 pour le récepteur  $U = E' + r'I$

La différence de potentiel étant commune on a :

$$\begin{aligned} E - rI &= E' + r'I \\ E - E' &= rI + r'I \\ &= I(r + r') \end{aligned}$$

d'où :  $I = \frac{E - E'}{r + r'}$

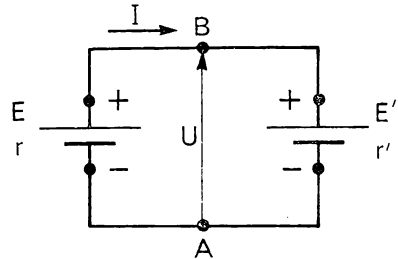


Fig. 104. — Le pôle positif du récepteur doit être relié au pôle positif du générateur.

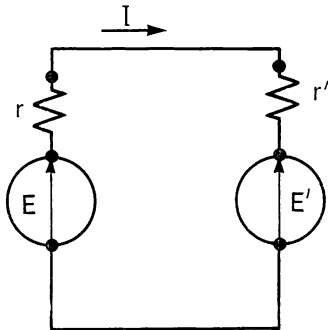


Fig. 105. —  $E$  et  $E'$  sont opposés, c'est leur différence qui engendre le courant  $I$  dans  $r + r'$ .

**3° Schéma équivalent** (revoir § 100 et 114). — Le schéma équivalent montre immédiatement que la différence

$$« E - E' »$$

engendre le courant  $I$  dans la somme des résistances (fig. 105).

**4° Remarque.** — Quand deux générateurs sont montés en opposition celui qui a la plus grande force électromotrice impose à l'autre son sens de courant. L'autre fonctionne en récepteur et sa force électromotrice agit comme une force contre-électromotrice. La formule du 2° est

applicable et le schéma équivalent est celui de la figure 105 (Problème 17. 04).

## 120. Circuit complet le plus simple.

**1° Description** (fig. 106). — Il comporte : un générateur, un récepteur, une résistance pure.

La résistance pure pouvant être constituée par les fils de ligne dont la résistance n'est pas toujours négligeable.

**2° Formule.** — La formule appliquée découle immédiatement du circuit équivalent : la différence entre la force électromotrice du générateur et la force contre-électromotrice du récepteur engendrant le courant dans la somme des résistances puisque celles-ci se trouvent en série (fig. 107).

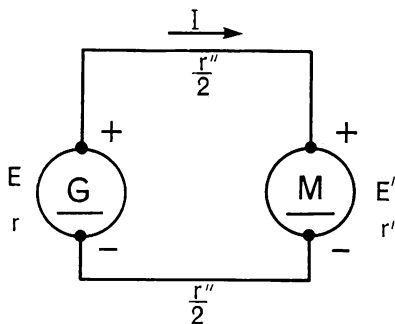


Fig. 106. — Les fils de ligne sont en série avec le moteur.

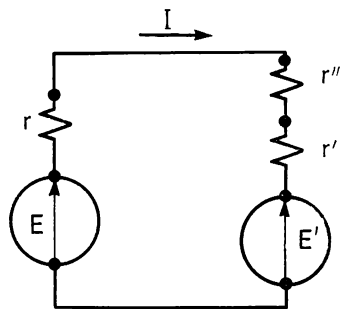


Fig. 107. — La résistance des fils de ligne est symbolisée par  $r''$ .

Si  $r$  est la résistance du générateur,  $r'$  celle du récepteur et  $r''$  celle des deux fils de ligne :

$$I = \frac{E - E'}{r + r' + r''}$$

Il est plus simple pour retenir la formule de poser :

$$r + r' + r'' = R_t$$

$R_t$  = résistance totale du circuit.

On obtient la formule :

$$(26) \quad \boxed{I = \frac{E - E'}{R_t}}$$

**3°** La formule (26) s'étend au cas où d'autres résistances pures sont aussi en série avec le générateur et le récepteur. La résistance totale doit alors tenir compte de ces nouvelles résistances,

**4° Calcul des différences de potentiel.** — Quand on connaît le courant dans le circuit, donc dans chaque appareil, on applique la loi d'Ohm relative à chacun d'eux pour trouver les différences de potentiel.

**5° Exemple.** — Un générateur de force électromotrice  $E = 130$  V et de résistance interne  $r = 0,5 \, \Omega$  débite par l'intermédiaire de deux fils de ligne ayant chacun une résistance de  $0,2 \, \Omega$  sur un circuit comportant en série une résistance pure  $R = 3,5 \, \Omega$  et un moteur de force contre-électromotrice  $E' = 100$  V et de résistance  $r' = 0,6 \, \Omega$ . Calculer l'intensité du courant dans le circuit et la différence de potentiel entre les bornes de chaque élément du circuit.

— SOLUTION —

Résistance totale :

$$R_t = 0,5 + 0,2 + 0,2 + 3,5 + 0,6$$

(r)      (fils de ligne) (R)      (r')

$$R_t = 5 \, \Omega$$

Courant :

$$I = \frac{E - E'}{R_t} = \frac{130 - 100}{5} = 6 \, \text{A}$$

Différences de potentiel :

Générateur :

$$U = E - r I = 130 - 0,5 \times 6$$

$$= 127 \, \text{V}$$

Fils de ligne (chaque) :

$$u = 0,2 \times 6 = 1,2 \, \text{V}$$

Résistance pure :

$$U_1 = R I = 3,5 \times 6 = 21 \, \text{V}$$

Moteur :

$$U_2 = E' + r' I = 100 + 0,6 \times 6$$

$$= 103,6 \, \text{V}$$

**Vérification.** — La somme des différences de potentiel doit être égale à celle du générateur :

$$u + U_1 + U_2 + u = 1,2 + 21 + 103,6 + 1,2$$

$$= 127 \, \text{V}$$

### 121. Loi d'Ohm généralisée.

1° Elle s'applique au seul cas où tous les appareils sont montés en série.

On effectue séparément :

- a) La somme des forces électromotrices;
- b) La somme des forces contre-électromotrices;
- c) La somme des résistances.

Le courant est alors :

$$I = \frac{\text{Somme des f.é.m} - \text{Somme des f.c.é.m}}{\text{Somme des résistances}}$$

pour simplifier l'écriture on emploie la lettre grecque  $\Sigma$  qui signifie alors « somme de » et l'on a :

$$(27) \quad I = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{\Sigma R}$$

2° Selon les besoins cette formule s'écrit :

$$\Sigma E = \Sigma E' + I \Sigma R \quad \Sigma R = \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{I} \quad \Sigma E' = \Sigma E - I \Sigma R$$

3° REMARQUE. — Les formules (24) et (26) sont des cas particuliers de la formule (27).

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

17. 01. — Un générateur de force électromotrice 130 V et de résistance interne  $r = 0,5 \, \Omega$  alimente deux récepteurs en série :

— Un moteur de force contre-électromotrice  $E' = 90 \, \text{V}$  et de résistance  $r' = 1 \, \Omega$ ;

— Une résistance variable  $R$ .

1° Calculer, quand  $R = 11 \, \Omega$ , l'intensité du courant dans le circuit et les tensions aux bornes de chaque appareil;

2° On désire que le moteur donne une puissance électrique utile de 900 W, quelle valeur doit-on donner à  $R$ ?

— SOLUTION —

1°) Résistance totale du circuit :

$$R_t = 0,5 + 1 + 11 = 12,5 \, \Omega$$

Intensité du courant :

$$I = \frac{E - E'}{R_t} = \frac{130 - 90}{12,5} = 3,2 \, \text{A}$$



Calcul des tensions :

a) Générateur :  $U = E - rI = 130 - 0,5 \times 3,2 = 128,4 \text{ V}$

b) Récepteur :  $U_2 = E' + r'I = 90 + 1 \times 3,2 = 93,2 \text{ V}$

c) Résistance R :  $U_1 = RI = 11 \times 3,2 = 35,2 \text{ V}$

d) Vérification :  $U = U_1 + U_2 = 93,2 + 35,2 = 128,4 \text{ V}$

2°) La puissance électrique utile est :

$$P_{eu} = E'I$$

On doit donc avoir :

$$I = \frac{P_{eu}}{E'} = \frac{900}{90} = 10 \text{ A}$$

La résistance totale du circuit sera :

$$R_t = \frac{E - E'}{I} = \frac{130 - 90}{10} \\ = 4 \Omega$$

Valeur de la résistance R :

$$R = R_t - r - r' = 4 - 0,5 - 1 \\ = 2,5 \Omega$$

**17. 02.** — Un générateur de résistance interne  $r = 0,2 \Omega$  et de 240 V de force électromotrice est relié, par l'intermédiaire de 2 fils de ligne ayant chacun une résistance  $r'' = 0,05 \Omega$  à un moteur de 216 V de force contre-électromotrice et de  $0,3 \Omega$  de résistance interne. Calculer :

1° L'intensité du courant ;

2° La différence de potentiel du moteur ;

3° La différence de potentiel du générateur.

— SOLUTION —

1°) Résistance totale :  $R_t = 0,2 + 0,05 + 0,05 + 0,3 \\ = 0,6 \Omega$

Intensité du courant :  $I = \frac{E - E'}{R_t} = \frac{240 - 216}{0,6} \\ = 40 \text{ A}$

2°) Différence de potentiel du moteur :

$$U_M = E' + r'I = 216 + 0,3 \times 40 \\ = 228 \text{ V}$$

3°) Différence de potentiel du générateur :

$$U_G = E - rI = 240 - 0,2 \times 40 \\ = 232 \text{ V}$$

Vérification : les 4 V de différence (232 — 228) sont perdus en ligne :

$$2u = 2 r''I = 2 \times 0,05 \times 40 = 4 \text{ V}$$

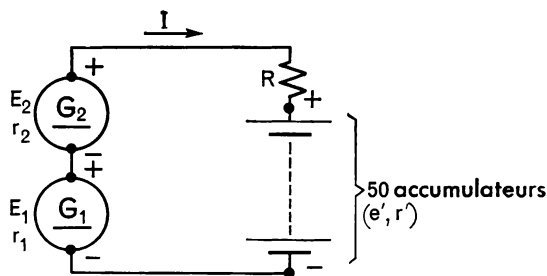


Fig. 108.

17. 03. — Deux générateurs  $G_1$  et  $G_2$  sont en série (fig. 108).

On donne pour  $G_1$  :  $E_1 = 120 \text{ V}$   $r_1 = 0,5 \Omega$  et pour  $G_2$  :  $E_2 = 24 \text{ V}$   $r_2 = 0,25 \Omega$

Ils alimentent un circuit comprenant en série une résistance  $R = 1,5 \Omega$  et 50 accumulateurs à recharger dont la force contre-électromotrice sup-

posée constante est  $e = 2,1 \text{ V}$  et la résistance interne  $r' = 0,02 \Omega$  (par accumulateur). Calculer :

- 1° L'intensité du courant dans le circuit;
- 2° La différence de potentiel entre les bornes de chaque accumulateur;
- 3° Les pertes joules pour l'ensemble du circuit.

— SOLUTION —

1° Résistance totale :

$$\begin{aligned} R_t &= r_1 + r_2 + R + 50 r' \\ &= 0,5 + 0,25 + 1,5 + 0,02 \times 50 \\ R_t &= 3,25 \Omega \end{aligned}$$

Somme des forces électromotrices :

$$\Sigma E = 120 + 24 = 144 \text{ V}$$

Somme des forces contre-électromotrices :

$$\Sigma E' = 2,1 \times 50 = 105 \text{ V}$$

Courant

$$\begin{aligned} I &= \frac{\Sigma E - \Sigma E'}{R_t} = \frac{144 - 105}{3,25} \\ &= \frac{39}{3,25} = 12 \text{ A} \end{aligned}$$

2° Différence de potentiel :

$$\begin{aligned} U &= e' + r' I = 2,1 + 0,02 \times 12 \\ &= 2,34 \text{ V} \end{aligned}$$

3° Pertes joules :

Toutes les résistances étant traversées par le même courant le calcul peut être effectué sur  $R_t$  :

$$\begin{aligned} P_f &= R_t I^2 = 3,25 \times 12 \times 12 \\ &= 468 \text{ W} \end{aligned}$$

REMARQUE. — On pourra effectuer à titre d'exercice le calcul des autres tensions et vérifier.

## II. AVEC RÉPONSES.

17. 04. — Deux accumulateurs sont montés en parallèle donc en opposition (fig. 109). Les forces électromotrices sont  $E_1 = 2,1 \text{ V}$  et  $E_2 = 2 \text{ V}$ . Les résistances internes sont égales et valent  $0,001 \Omega$ . Calculer le courant de « circulation » qui est débité par le générateur 1 dans le générateur 2. Quelle est la différence de potentiel commune?

Réponses :  $50 \text{ A} \div 2,05 \text{ V}$

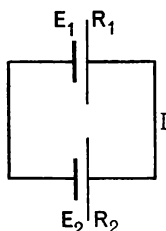


Fig. 109.

17. 05. — On se propose de recharger une batterie de 60 accumulateurs ayant chacun une résistance interne de  $0,005 \Omega$ . La force contre-électromotrice d'un accumulateur est  $1,8 \text{ V}$  au début de la charge et  $2,3 \text{ V}$  à la fin. On désire avoir un courant de charge constant de  $10 \text{ A}$ .

1° Quelle est la différence de potentiel minimale dont on doit disposer?

2° Le générateur utilisé a une force électromotrice de  $150 \text{ V}$  et une résistance interne de  $0,2 \Omega$ . Calculer la valeur  $X_1$  de la résistance à placer en série au début de la charge et la valeur  $X_2$  pour la fin de charge.

Réponses :  $141 \text{ V} \div 3,7 \Omega \div 0,7 \Omega$ .

## III. A RÉSOUDRE.

17. 06. — Un générateur alimente sous une différence de potentiel de  $120 \text{ V}$  un moteur de  $102 \text{ V}$  de force contre-électromotrice et de  $0,6 \Omega$  de résistance interne par l'intermédiaire d'une ligne de résistance totale  $0,2 \Omega$ . Calculer :

1° L'intensité du courant;

2° La différence de potentiel du moteur;

3° La force électromotrice du générateur si sa résistance interne est  $0,4 \Omega$ .

17. 07. — Deux générateurs sont en opposition, l'un d'eux fonctionne donc en récepteur. On donne :

$$G_1 : E_1 = 240 \text{ V} \quad r_1 = 1,5 \Omega$$

$$G_2 : E_2 = 230 \text{ V} \quad r_2 = 1 \Omega$$

Calculer le courant de circulation et la différence de potentiel commune.

17. 08. — Un générateur ( $E = 130 \text{ V}$   $r = 0,8 \Omega$ ) alimente un circuit comportant en série une résistance  $R$  et un moteur ( $E' = 100 \text{ V}$   $r' = 1,2 \Omega$ ). Calculer la résistance  $R$  pour que le courant soit de  $5 \text{ A}$ .

Quelles sont alors les différences de potentiel entre les bornes des divers appareils?

17. 09. — Une ligne en cuivre ( $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ) a 100 m de longueur (chaque fil) et  $6,4 \text{ mm}^2$  de section. A une extrémité se trouve un générateur ( $E = 235 \text{ V}$   $r = 1,2 \Omega$ ) et à l'autre est placé un moteur ( $E' = 196 \text{ V}$   $r' = 1,3 \Omega$ ). Calculer :

- 1° La résistance de la ligne;
- 2° L'intensité du courant;
- 3° La différence de potentiel du moteur;
- 4° La chute de tension et les pertes joules dans la ligne.

17. 10. — Deux moteurs  $M_1$  et  $M_2$  sont en série :

$$\begin{array}{ll} M_1 : E'_1 = 92 \text{ V} & r'_1 = 1,5 \Omega \\ M_2 : E'_2 = 100 \text{ V} & r'_2 = 1 \Omega \end{array}$$

Ils sont alimentés par un générateur ayant 260 V de force électromotrice et  $0,9 \Omega$  de résistance interne.

1° Calculer l'intensité du courant et la différence de potentiel entre les bornes de chaque moteur. Vérifier.

2° Quelle devrait être l'intensité du courant pour que les différences de potentiel soient égales pour les deux moteurs? Quelle résistance  $R$  faut-il mettre en série avec eux pour que cette condition soit réalisée?

---

## ÉLECTROLYSE

### LOIS QUALITATIVES

#### 122. Faits d'expérience.

**1<sup>o</sup> Expérience.** — Réalisons une expérience très simple mais très convaincante. Montons en série sur le secteur (prise de courant de la maison) une lampe électrique et un verre contenant de l'eau du robinet ou, mieux, de l'eau distillée : la lampe n'éclaire pas, il ne passe aucun courant dans le circuit.

Ajoutons à l'eau du sel de cuisine (fin ou gros) : la lampe se met à briller progressivement au fur et à mesure que le sel se dissout (fig. 110).

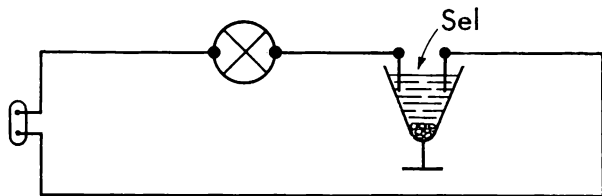


Fig. 110. — Le filament brille peu à peu.

**2<sup>o</sup> Interprétation.** — L'eau pure n'est pas conductrice, l'eau additionnée de sel est conductrice.

**3<sup>o</sup> Autres phénomènes.** — *a)* Dans l'expérience précédente, si on laisse passer le courant pendant quelques minutes l'eau prend une coloration verdâtre. Il y a donc apparition d'un nouveau produit dans le verre.

*b)* Plus généralement le passage du courant électrique dans un liquide conducteur entraîne des réactions chimiques au sein de ce liquide (conférer les nombreux exemples de la leçon).

*c)* On donne le nom d'**électrolyse** aux phénomènes ci-dessus et qui font l'objet de la leçon.

### 123. Électrolytes.

**1<sup>o</sup> Définition.** — *Un électrolyte est un corps qui en solution aqueuse (dans l'eau), ou fondu, se laisse traverser par le courant électrique et est alors le siège de réactions chimiques.*

**2<sup>o</sup> Principaux électrolytes.** — Seuls les acides, les bases et les sels sont des électrolytes. Citons-en quelques-uns.

*Acides :*

|                     |                                   |
|---------------------|-----------------------------------|
| Acide chlorhydrique | (HCl)                             |
| Acide sulfurique    | (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) |

*Bases :*

|         |        |
|---------|--------|
| Soude   | (NaOH) |
| Potasse | (KOH)  |

*Sels :*

|                    |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| Chlorure de sodium | (NaCl)                             |
| Chlorure cuivrique | (CuCl <sub>2</sub> )               |
| Sulfate de sodium  | (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) |
| Sulfate de cuivre  | (CuSO <sub>4</sub> )               |
| Nitrate d'argent   | (AgNO <sub>3</sub> )               |

REMARQUE. — Les métaux fondus sont bons conducteurs mais ne sont pas des électrolytes.

**3<sup>o</sup> Dissociation des électrolytes.** — a) *Théorie d'Arrhénius* : préalablement à toute action électrique, les électrolytes en solution aqueuse sont dissociés en IONS :

— les ions positifs, ou cations, qui sont constitués par l'hydrogène ou le métal après la perte d'un ou de plusieurs électrons;

— les ions négatifs, ou anions, qui sont constitués par le reste de la molécule après le gain d'un ou de plusieurs électrons.

b) *Exemples :*

|                               |                                                                     |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Chlorure de sodium (fig. 111) | NaCl → Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>                            |
| Soude (fig. 112)              | NaOH → Na <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>                            |
| Acide chlorhydrique           | HCl → H <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>                              |
| Nitrate de sodium             | NaNO <sub>3</sub> → Na <sup>+</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  |
| Sulfate de cuivre             | CuSO <sub>4</sub> → Cu <sup>++</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> |

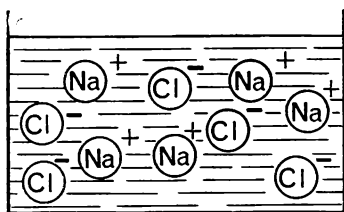


Fig. 111. — Chlorure de sodium en solution.

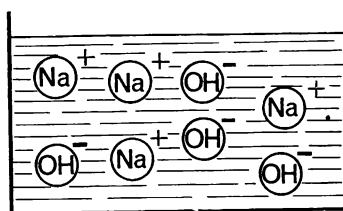


Fig. 112. — Soude en solution.

REMARQUE. — L'eau, même pure, est également très légèrement dissociée :



**4<sup>o</sup> Charge des ions.** — Un ion, dont la valence est  $v$  dans l'électrolyte, possède, après dissociation, une charge égale à  $ve$  ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C). Si l'ion est positif sa charge est  $+ve$  et s'il est négatif sa charge est  $-ve$ .

## 124. Une électrolyse simple : celle du chlorure cuivrique.

**1<sup>o</sup> Expérience.** — Dans un tube en U contenant du chlorure cuivrique en solution plaçons deux électrodes en carbone et appliquons entre elles une différence de potentiel (fig. 113). Nous constatons :

a) qu'un dégagement gazeux se produit sur l'anode; le gaz de couleur verdâtre et d'odeur caractéristique est du chlore;

b) que la cathode se recouvre d'un dépôt de cuivre;

c) que dans la solution aucun phénomène visible ne se produit.

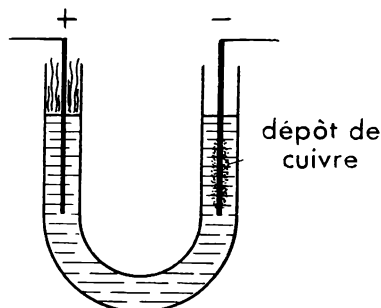


Fig. 113. — Le chlore se dissout dans l'eau puis se dégage quand l'eau est saturée.

### 2<sup>o</sup> Interprétation des phénomènes constatés.

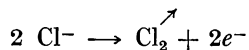
a) Avant toute action électrique, le chlorure cuivrique était dissocié en ions :



b) quand on applique une différence de potentiel, les ions négatifs  $\text{Cl}^-$  se dirigent vers l'électrode positive (anode) et les ions positifs  $\text{Cu}^{++}$  se dirigent vers l'électrode négative (cathode).

c) Arrivés sur leurs électrodes respectives, les ions perdent leur charge :

— à l'anode (positive), les ions négatifs abandonnent leur électron et les atomes ainsi reconstitués s'associent deux à deux, du gaz chlore se dégage <sup>(1)</sup> :



— à la cathode (négative), les ions cuivriques prélèvent deux électrons et le cuivre se dépose :



d) *Bilan de l'électrolyse* :

— d'une part, dans la solution, il y a une double migration d'ions qui produit un transport de charges négatives de la cathode vers l'anode

— d'autre part sur les électrodes deux réactions chimiques se produisent <sup>(2)</sup> :

— à l'anode il y a oxydation des ions  $\text{Cl}^-$

— à la cathode, il y a réduction des ions  $\text{Cu}^{++}$ .

## 125. Électrolyses complexes.

1° L'électrolyse que nous venons d'étudier est simple parce que les ions provenant de la dissociation de l'électrolyte donnent après leur décharge sur les électrodes les atomes qui leur correspondent.

2° Souvent des phénomènes plus complexes se produisent; ils peuvent être dus :

a) *à la nature des électrodes* : une électrode métallique peut donner des cations qui passent en solution, c'est le phénomène de l'**anode soluble** ;

b) *à la présence de l'eau*, dont les ions sont parfois plus facilement oxydés ou réduits que ceux de l'électrolyte;

c) à la décomposition de certains ions lors de leur décharge.

(1) Nous notons  $e^-$ , la charge d'un électron.

(2) Voir *Optique et Chimie*, par R. ANTOINE et J. NIARD (Masson et C<sup>ie</sup>).



## 126. Anode soluble. Électrolyse du sulfate de cuivre.

1<sup>o</sup> **Expérience.** — Elle est réalisée avec des électrodes en cuivre (fig. 114). Nous constatons que la cathode augmente de volume au détriment de l'anode. Il est facile de vérifier que l'augmentation de masse de la cathode est égale à la diminution de masse de l'anode; l'électrolyse se traduit donc par un transfert de cuivre de l'anode vers la cathode.

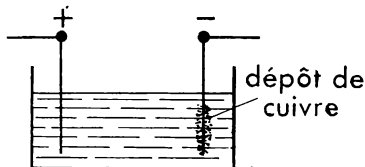
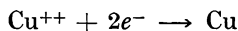


Fig. 114. — Électrolyse du sulfate de cuivre.

2<sup>o</sup> **Interprétation des phénomènes constatés.** — L'électrolyte

étant préalablement dissocié en ions :  $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$

a) quand on applique une différence de potentiel, les ions  $\text{Cu}^{++}$  se dirigent vers la cathode (négative), y prélèvent deux électrons, sont réduits, et les atomes de cuivre se déposent.



b) Les ions  $\text{SO}_4^{--}$  se dirigent vers l'anode, leur accumulation au voisinage de celle-ci provoque l'ionisation d'atomes de cuivre qui passent en solution sous la forme d'ions, le cuivre est oxydé :



c) *Bilan de l'électrolyse*: elle produit un transport de cuivre de l'anode vers la cathode et d'électrons de la cathode vers l'anode tandis que la concentration de la solution ( $\text{Cu}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ) reste inchangée.

d) *Remarque*: on retrouvera un bilan identique chaque fois que l'électrolyse d'un sel de métal M sera effectuée avec une anode du même métal M.

## 127. Intervention du solvant (eau). Électrolyse de l'acide sulfurique.

1<sup>o</sup> **Expérience.** — L'électrolyse est réalisée avec des électrodes inattaquables, en platine. On recueille de l'hydrogène à la cathode et de l'oxygène à l'anode (fig. 115). Tout se passe comme si, seule, l'eau avait été électrolysée.

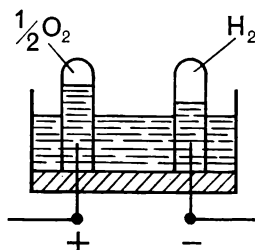
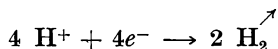


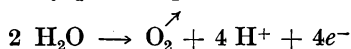
Fig. 115. — Électrolyse de l'acide sulfurique.

**2° Analyse des phénomènes.** — L'acide sulfurique étant préalablement dissocié en ions :  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{H}^+ + \text{SO}_4^{--}$

a) quand on applique la différence de potentiel, les ions  $\text{H}^+$  se dirigent vers la cathode, y prélèvent chacun un électron, sont réduits, et le gaz hydrogène se dégage :



b) les ions  $\text{SO}_4^{--}$  se dirigent vers l'anode mais leur oxydation ne s'y produit pas, ils restent en solution et l'on a :



c) *Bilan de l'électrolyse* : les électrons prélevés à la cathode sont restitués à l'anode et il y a dégagement d'hydrogène et d'oxygène comme si, seule, l'eau était électrolysée.

## 128. Électrolyse de la soude.

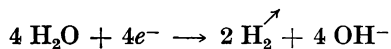
**1° Expérience.** — On obtient, comme dans le cas de l'acide sulfurique, un dégagement d'hydrogène à la cathode et d'oxygène à l'anode (fig. 116).

**2° Analyse des phénomènes.** — La soude étant préalablement dissociée en ions :  $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$

a) quand on applique une différence de potentiel, les ions  $\text{OH}^-$  se dirigent vers l'anode, y cèdent leurs électrons, et de l'oxygène se dégage :



b) les ions  $\text{Na}^+$  se dirigent vers la cathode mais n'y sont pas réduits et l'on a :



c) *Bilan de l'électrolyse* : Les électrons prélevés à la cathode sont restitués à l'anode et il y a dégagement d'hydrogène et d'oxygène comme si, seule, l'eau était électrolysée.

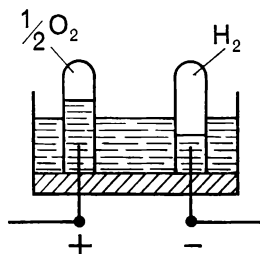


Fig. 116. — Électrolyse de la soude.

## 129. Électrolyse du sulfate de sodium.

**1<sup>o</sup> Expérience.** — L'électrolyse est effectuée avec des électrodes en carbone (fig. 117). A la cathode on obtient un dégagement d'hydrogène et à l'anode un dégagement d'oxygène. En outre, la forme en U du

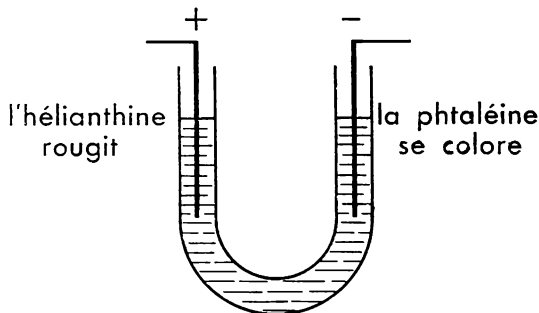
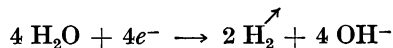


Fig. 117. — Électrolyse du sulfate de sodium.

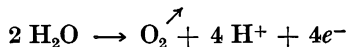
tube évite le brassage de la solution et permet de constater la coloration en violet de la phtaléine à la cathode (présente d'ions  $\text{OH}^-$ ) et le virage au rouge de l'hélianthine à l'anode (présence d'ion  $\text{H}^+$ ).

**2<sup>o</sup> Analyse des phénomènes.** — Le sulfate de sodium étant préalablement dissocié en ions :  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2 \text{Na}^+ + \text{SO}_4^{--}$

a) les ions  $\text{Na}^+$  se dirigent vers la cathode et l'on retrouve les phénomènes du § 128,



b) les ions  $\text{SO}_4^{--}$  se dirigent vers l'anode et l'on retrouve les phénomènes du § 127,



c) *Bilan de l'électrolyse* : tout se passe comme si, seule, l'eau était électrolysée. La concentration de la solution en ions  $\text{Na}^+$  et en ions  $\text{SO}_4^{--}$  est inchangée, pour le vérifier, il suffit, de provoquer un brassage de la solution en retournant le tube et en l'agitant : la phtaléine redevient incolore et l'hélianthine redevient orange.

**130. Conclusion. Lois qualitatives de l'électrolyse.**

---

1° Préalablement à toute action électrique, l'électrolyte est déjà dissocié en ions.

2° L'application d'une différence de potentiel provoque un tri des ions, les ions positifs se dirigeant vers la cathode et les ions négatifs se dirigeant vers l'anode.

3° Selon les cas, ces ions peuvent se déposer ou se dégager après décharge (électrolyse simple) ou donner lieu à des réactions plus complexes dans lesquelles interviennent soit les électrodes, soit le solvant (eau), ou encore des réactions qui correspondent à une décomposition d'ions polyatomiques.

4° Dans tous les cas les phénomènes apparents sont localisés sur les électrodes et il y a une oxydation sur l'anode et une réduction sur la cathode.

---

# ÉLECTROLYSE ÉTUDE QUANTITATIVE ET APPLICATIONS

## 131. *Expériences.*

1° **Première expérience.** — a) *Montage* (fig. 118). — Nous disposons en série trois voltamètres, ayant des formes et des dimensions quelconques, mais donnant tous de l'hydrogène à la cathode. Nous

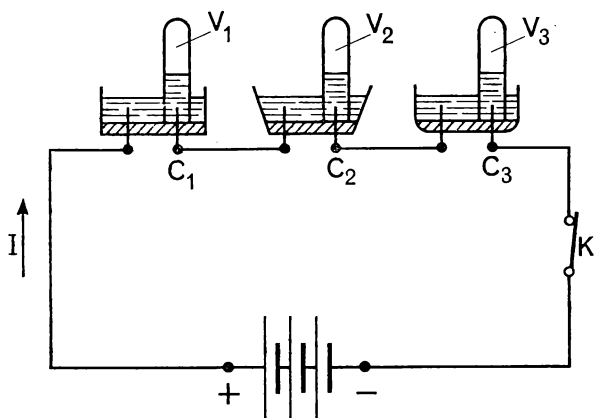


Fig. 118. — Les volumes d'hydrogène sont égaux et proportionnels à la durée de passage du courant.

pouvons donc choisir, par exemple, les trois électrolytes suivants : soude, acide sulfurique, sulfate de sodium.

Maintenons constante l'intensité  $I$  du courant.

b) *Constatations.* — 1° A chaque instant les trois volumes obtenus sont égaux :

$$V_1 = V_2 = V_3$$

2° L'un quelconque de ces volumes est proportionnel à la durée de passage du courant, par exemple :

Au bout de 2, 4, 6 mn .....

Nous trouvons 9, 18, 27 cm<sup>3</sup>.

c) *Conclusion.* — Le volume d'hydrogène (donc la masse) obtenu dans une électrolyse est proportionnel à la durée de passage du courant.

2° **Deuxième expérience.** — a) *Montage* (fig. 119). — Nous plaçons le voltamètre n° 1 dans le circuit principal et les deux voltamètres n° 2 et n° 3 en dérivation.

Laissons passer le courant pendant une durée de quelques minutes.

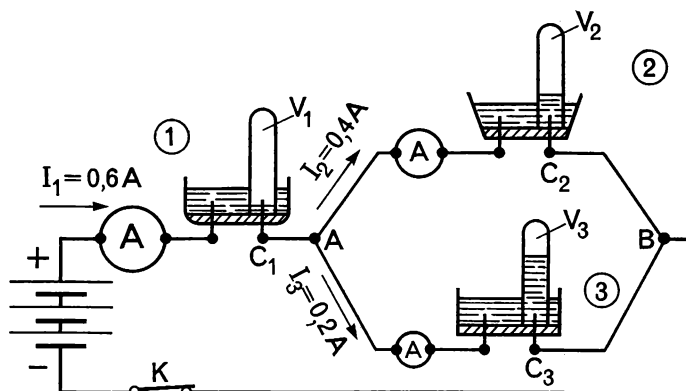


Fig. 119. — Les volumes sont proportionnels aux courants.

b) *Constatations.* — Nous trouvons par exemple pour :

$$I_1 = 0,6 \text{ A} \quad I_2 = 0,4 \text{ A} \quad I_3 = 0,2 \text{ A}$$

les volumes suivants :

$$V_1 = 18 \text{ cm}^3 \quad V_2 = 12 \text{ cm}^3 \quad V_3 = 6 \text{ cm}^3$$

c) *Conclusion.* — Le volume d'hydrogène (donc la masse) obtenu dans une électrolyse est proportionnel à l'intensité du courant.

### 132. Première loi quantitative.

1° Elle a été énoncée par Faraday.

2° Le volume (ou la masse) d'hydrogène étant proportionnel à  $I$  et à  $t$  est proportionnel à leur produit donc à la quantité d'électricité  $Q$ .

3° Les expériences faites avec l'hydrogène pourraient être renouvelées avec un métal quelconque, elles conduiraient aux mêmes conclusions.

4° **Loi.** — La masse de métal (ou d'hydrogène) obtenue à la cathode d'un voltamètre est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé ce voltamètre.

5° **Remarque.** — La loi a été énoncée sous la forme la plus simple. Elle reste vraie pour les masses d'électrolyte décomposée, pour les masses obtenues à l'anode, etc.

### 133. Troisième expérience.

1° **Montage** (fig. 120). — Disposons en série trois voltamètres donnant à la cathode des produits différents. Par exemple, choisissons les trois électrolytes suivants :

La soude qui donne de l'hydrogène

Le sulfate de cuivre qui donne du cuivre

Le nitrate d'argent qui donne de l'argent.

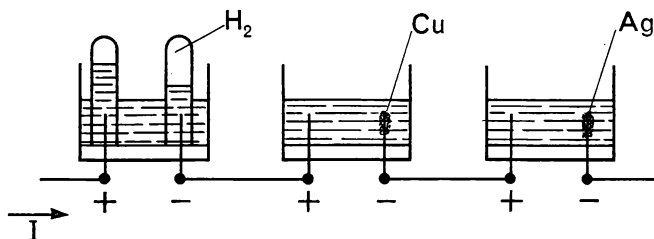


Fig. 120.

2° **Constatations.** — Le passage d'un courant de 0,8 A pendant 2 mn environ donne :

11,2 cm<sup>3</sup> d'hydrogène soit 1 mg  
 32 mg de cuivre  
 108 mg d'argent

Or les masses atomiques de ces éléments sont respectivement :

1 g; 64 g; 108 g

Les masses obtenues représentent donc :

$\frac{1}{1\ 000}$  ;  $\frac{0,5}{1\ 000}$  et  $\frac{1}{1\ 000}$  des atomes-grammes correspondants.

La quantité d'électricité qui est passée dans le circuit est :

$$Q = I t = 0,8 \times 120 \\ = 96\ C$$

avec 96 000 C environ (exactement avec 96 500 C) on aurait obtenu :

1 g soit 1 atome-gramme d'hydrogène (valence 1)  
 32 g soit 1/2 atome-gramme de cuivre (valence 2)  
 108 g soit 1 atome-gramme d'argent (valence 1).

**3° Conclusion.** — Nous voyons que 96 500 C libèrent une masse d'hydrogène ou de métal égale au quotient de la masse atomique par la valence.

Ce quotient a reçu le nom de **valence-gramme** :

$$\text{Valence-gramme} = \frac{\text{masse atomique}}{\text{valence}}$$

#### 134. Deuxième loi quantitative.

- 1° Elle a été énoncée par Faraday.  
 2° La quantité d'électricité égale à 96 500 C s'appelle *constante de Faraday*.

**3° Loi.** — Quand une même quantité d'électricité traverse plusieurs voltamètres elle libère dans chacun d'eux le même nombre de valences-grammes; pour libérer une valence-gramme il faut 96 500 C.

#### 135. Formule.

- 1° Nous traduirons les deux lois quantitatives par une seule formule :

$$(28) \quad \boxed{m = \frac{A}{v} \frac{I t}{96\ 500}}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} A & \text{masse atomique} \\ v & \text{valence} \\ I & \text{en ampères} \\ t & \text{en secondes} \\ m & \text{en grammes} \end{array} \right.$$



2° On vérifie immédiatement que :

a)  $m$  est proportionnelle à  $Q = It$

b) Si  $Q = It = 96\,500\text{ C}$

$$m = \frac{A}{v}$$

3° On s'explique maintenant la définition du coulomb (chap. 4, § 28) :

Le coulomb est la quantité d'électricité qui, dans un voltamètre à nitrate d'argent, dépose à la cathode une masse de 1,118 mg d'argent <sup>(1)</sup>.

Si  $It = 1\text{ C}$ , on trouve pour l'argent :

$$m = \frac{108}{1} \times \frac{1}{96\,500} = 0,001118\text{ g}$$

soit 1,118 mg

### 136. Applications industrielles.

1° **Fabrication de produits chimiques.** — Chlore, sodium, potassium, eau de javel, chlorate de potassium...

2° **Métallurgie de l'aluminium.** — L'oxyde d'aluminium n'est pas réductible à l'état d'aluminium par le carbone.

Pour obtenir l'aluminium on électrolyse l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) fondue dans de la cryolithe.

L'anode (+) est un cylindre en graphite et la cathode (—) est constituée par la cuve elle-même (fig. 121).

L'électrolyse se fait sous une tension de 6 à 8 V et avec un courant de plusieurs dizaines de milliers d'ampères.

REMARQUE. — C'est aussi par électrolyse que l'on prépare le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium...

3° **Affinage des métaux.** — Pour le cuivre, par exemple, l'électrolyse est effectuée avec une solution de sulfate de cuivre. L'anode est en cuivre impur (1 % d'impuretés) et la cathode en cuivre pur.

Le cuivre affiné vient se déposer sur la cathode au cours de l'électrolyse. C'est l'électrolyse (à anode soluble) du § 127 de la leçon précédente qui est ainsi répétée.

REMARQUE. — On affine aussi le fer par électrolyse.

---

(1) Rappelons que cette définition n'est plus légale.

4° **Dépôts métalliques.** — a) *But.* — Ils ont pour but de protéger certains métaux de l'oxydation et de leur donner en même temps un aspect agréable.

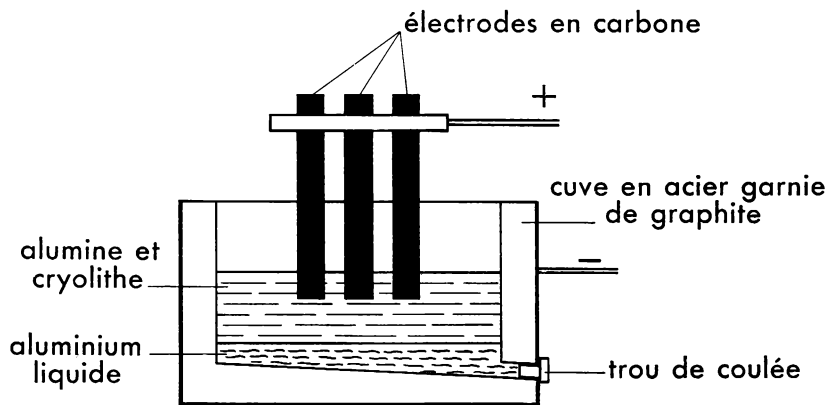


Fig. 121. — Cuve pour la préparation de l'aluminium.

b) *Principe.* — L'anode est constituée par une plaque du métal à déposer.

L'électrolyte est une solution d'un sel de ce même métal.

L'objet à métalliser est placé comme cathode.

c) *Détails techniques.* — Signalons que :

Les pièces sur lesquelles on veut effectuer un dépôt doivent être très propres, en particulier parfaitement dégraissées.

Il est souvent nécessaire d'ajouter au bain un ou plusieurs produits facilitant le dépôt.

Enfin pour obtenir un dépôt bien adhérent et ayant un bel aspect, il faut respecter dans chaque cas la densité de courant convenable. Cette densité varie de  $0,1 \text{ A/dm}^2$  <sup>(1)</sup> à  $10 \text{ A/dm}^2$  suivant la nature du dépôt.

d) *Différents dépôts :*

|        |             |
|--------|-------------|
| Argent | (argenture) |
| Chrome | (chromage)  |
| Cuivre | (cuivrage)  |
| Nickel | (nickelage) |
| Or     | (dorure)    |

(1) La surface à considérer est celle de l'objet à métalliser

5° **Galvanoplastie.** — a) La galvanoplastie est la reproduction d'objets à partir d'un moule.

b) Le moule doit servir de cathode; s'il n'est pas conducteur il faut au préalable le recouvrir d'une pellicule métallique.

c) On fabrique ainsi des médailles, des clichés d'imprimerie et des moules pour disques d'électrophone.

## PROBLÈMES

| MÉTAUX            | Masse atomique<br>A (g) | Valence<br>(v) | Masse volumique<br>$\mu$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------------------------|
| Hydrogène . . . . | 1                       | 1              | 0,09                                          |
| Aluminium . . . . | 27                      | 3              | 2 700                                         |
| Argent . . . . .  | 108                     | 1              | 10 500                                        |
| Chrome . . . . .  | 52                      | 3              | 6 920                                         |
| Cuivre . . . . .  | 64                      | 2              | 8 800                                         |
| Fer. . . . .      | 56                      | 2              | 7 800                                         |
| Nickel . . . . .  | 59                      | 2              | 8 600                                         |

### I. AVEC SOLUTION.

19. 01. — On électrolyse une solution de soude avec un courant de 2 A. Combien de temps faut-il pour obtenir 1 litre d'hydrogène?

— SOLUTION —

Masse d'hydrogène (11,2 l  $\rightarrow$  1 g) :

$$m = 1 \text{ g} \times \frac{1}{11,2} = 0,0893 \text{ g}$$

Quantité d'électricité (96 500 C donnent 1 g) :

$$Q = 96\,500 \times \frac{0,0893}{1} = 8\,620 \text{ C}$$

Durée :

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{8\,620}{2} = 4\,310 \text{ s}$$

**19. 02.** — On fabrique de l'aluminium par électrolyse sous une tension de 8 V et avec un courant de 50 000 A. Calculer :

1° La production horaire ainsi obtenue;

2° L'énergie électrique dépensée pour obtenir 1 kg de métal.

— SOLUTION —

1°) Quantité d'électricité horaire :

$$Q = It = 50\,000 \times 1 = 50\,000 \text{ Ah}$$

$$\text{Soit} \quad 3\,600 \times 50\,000 = 18,10^7 \text{ C}$$

$$\begin{aligned} \text{Production :} \quad m &= \frac{A}{v} \frac{It}{96\,500} \\ &= \frac{27}{3} \frac{18,10^7}{96\,500} = 16,8 \cdot 10^3 \text{ g} \\ &= 16,8 \text{ kg} \end{aligned}$$

2° Énergie totale dépensée :

$$\begin{aligned} W &= QU = 50\,000 \times 8 = 400\,000 \text{ Wh} \\ &= 400 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Énergie par kilogramme :

$$W = \frac{400}{16,8} \simeq 24 \text{ kWh}$$

**19. 03.** — On veut nickeler une plaque rectangulaire de  $600 \times 450$  (mm) avec une densité de courant de 5 A/dm<sup>2</sup>. L'épaisseur du dépôt devant atteindre 0,1 mm. Calculer :

1° La masse de nickel à déposer;

2° La quantité d'électricité nécessaire;

3° La durée de l'opération.

N. B. — On néglige l'épaisseur propre de la plaque.

— SOLUTION —

1°) Surface de la plaque (2 faces) :

$$\begin{aligned} 2 \times 600 \times 450 &= 540\,000 \text{ mm}^2 \\ &= 54 \text{ dm}^2 \end{aligned}$$

Volume de nickel :

$$\begin{aligned} V &= 540\,000 \times 0,1 = 54\,000 \text{ mm}^3 \\ &= 54 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Masse

$$\begin{aligned} m &= \mu V = 8\,600 \times 54 \cdot 10^{-6} \\ &= 0,464 \text{ kg} = 464 \text{ g} \end{aligned}$$

2°) Quantité d'électricité :

$$464 = m = \frac{59}{2} \frac{Q}{96\,500}$$

$$Q = \frac{96\,500 \times 464,4}{29,5}$$

$$= 1,52 \cdot 10^6 \text{ C}$$

3°) Intensité du courant :

$$I = 5 \times 54 = 270 \text{ A}$$

Durée  $t = \frac{Q}{I} = \frac{1,52 \cdot 10^6}{270} = 5\,630 \text{ s}$

## II. AVEC RÉPONSES.

19. 04. — On affine du cuivre sous une tension de 0,5 V et un courant de 200 A. Calculer la production journalière de cuivre (24 h) et l'énergie dépensée par kilogramme de cuivre affiné.

Réponses : 5,73 kg ÷ 0,42 kWh.

19. 05. — On veut obtenir un dépôt de 5/100 mm de chrome sur un objet ayant une surface de 40 dm<sup>2</sup>. La densité de courant est 10 A/dm<sup>2</sup>. Calculer :

1° La masse de chrome déposée.

2° La durée de l'opération.

Réponses : 0,138 kg ÷ 1 920 s.

## III. A RÉSOUDRE.

19. 06. — Dans les usines les plus récentes on fabrique l'aluminium sous une tension de 6 V et avec un courant de 100 000 A. Calculer :

1° La production journalière par cuve;

2° L'énergie consommée par kilogramme de métal.

19. 07. — Quelle est la quantité d'électricité nécessaire à l'affinage de 1 kg de fer? Combien de temps faut-il pour affiner 1 t avec un courant de 500 A?

19. 08. — Combien de temps faut-il pour obtenir 1 litre de chlore par électrolyse avec un courant de 2 A?

(On précise Cl = 35,5; monovalent.)

19. 09. — Quelle est la quantité d'électricité nécessaire à la fabrication de 1 kg de magnésium (Mg = 24, bivalent)?

19. 10. — Calculer les masses d'argent, de cuivre, d'aluminium et de fer obtenues avec une quantité d'électricité de 1 Ah.

## PILES HYDROÉLECTRIQUES

### 137. Pile historique de Volta.

**1° Constitution.** — La pile de Volta (1800) était constituée par des rondelles empilées en colonne (d'où le nom de pile).

On trouvait alternativement une rondelle de zinc, une rondelle de drap imprégnée d'acide sulfurique et une rondelle de cuivre (fig. 122). Cet ensemble de trois rondelles constituait un élément de pile. Plus on superposait d'éléments, plus la force électromotrice était grande.

**2° Expérience.** — Reconstituons la pile de Volta sous une forme pratique : dans un récipient en verre (cristallisoir) mettons une solution d'acide sulfurique au dixième et plongeons dedans une lame de zinc pur et une lame de cuivre (fig. 123).

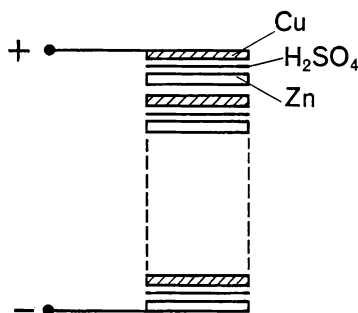


Fig. 122. — Pile historique de Volta, le cuivre est positif.

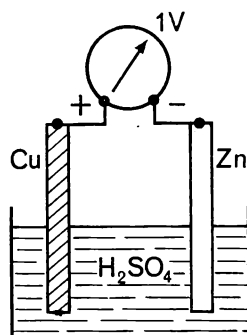


Fig. 123. — La force électromotrice est de 1 volt environ.

Un voltmètre branché entre les deux lames indique une différence de potentiel de 1 V environ. Le courant absorbé par le voltmètre étant négligeable cette différence de potentiel est égale à la force électromotrice de la pile.

D'autre part, pour que ce voltmètre (polarisé) dévie dans le bon sens il faut réunir son pôle plus (+) au cuivre et son pôle moins (—) au zinc.

Nous avons donc constitué un générateur d'électricité. Utilisons-le.

**3° Polarisation de la pile.** — Fermons la pile sur un circuit de quelques ohms en laissant le voltmètre branché (fig. 124).

Nous constatons que très vite, « à vue d'œil », l'indication du voltmètre diminue puis s'annule.

La pile est-elle déjà usée? Non, si nous en avons le temps, laissons-la 10 ou 20 mn à circuit ouvert; elle retrouve au moins une partie de sa force électromotrice et la retrouverait toute au bout d'un temps plus long.

Il est bien évident qu'une telle pile est inutilisable puisqu'elle perd très vite sa force électromotrice : on dit qu'elle se **polarise**, le phénomène correspondant s'appelle **polarisation**.

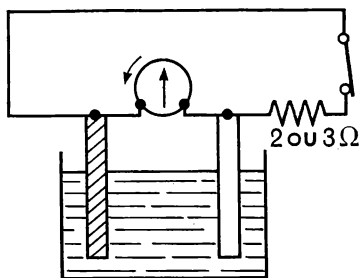
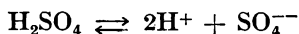


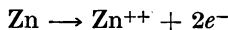
Fig. 124. — Dès que la pile débite, on « voit » la différence de potentiel diminuer.

### 138. Principe de la pile de Volta.

**1° Apparition de la force électromotrice.** — L'acide sulfurique est dissocié en ions (chap. 18, § 124) :



les ions  $\text{SO}_4^{--}$ , qui sont en contact avec le zinc pur, provoquent l'ionisation des atomes de celui-ci :



et peu à peu, l'électrode en zinc se charge négativement et finit par repousser les ions sulfuriques  $\text{SO}_4^{--}$ .

L'ionisation du zinc est alors bloquée (si le zinc est bien pur).

L'électrode en zinc étant chargée négativement, la pile possède une force électromotrice (fig. 123).

**2° Établissement du courant.** — Si à l'extérieur de la pile on établit un circuit entre le zinc et le cuivre (fig. 124) les électrons du zinc vont s'écouler jusqu'au cuivre.

Le zinc ayant perdu ses charges est à nouveau attaquant, le cuivre ayant reçu des charges négatives va attirer les ions  $H^+$  et les décharger.

Il semble donc qu'un courant puisse ainsi circuler indéfiniment (fig. 125).

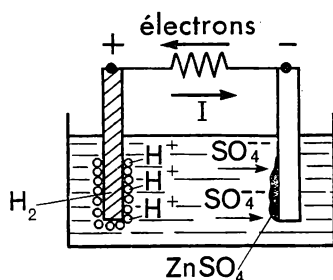


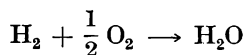
Fig. 125. — Principe de la pile de Volta.

**3° Polarisation.** — Les ions  $H^+$  une fois déchargés forment autour du cuivre une gaine d'hydrogène gazeux, cette gaine est isolante : la force électromotrice de la pile s'annule parce qu'il n'y a plus *contact électrique* entre le cuivre et l'électrolyte. La pile est polarisée.

**4° Dépolarisation.** — Pour rendre la pile réutilisable il est nécessaire de la « dépolariser » en éliminant l'hydrogène qui est autour du cuivre :

a) On peut sortir le cuivre et l'essuyer.

b) On peut aussi envisager la destruction de l'hydrogène, au fur et à mesure de sa formation, à l'aide d'un oxydant :



La pile de Volta a un intérêt historique mais n'est plus utilisée.

### 139. Force électromotrice d'une pile.

**1° Influence des électrodes.** — a) *Formes et dimensions.* — Remplaçons les électrodes de la pile de Volta par d'autres de même métal (Zn et Cu) mais de formes et de dimensions variables, la force électromotrice est inchangée.

Déplaçons les électrodes, rapprochons-les, écartons-les, soulevons-les... la force électromotrice est inchangée.

b) *Nature.* — Remplaçons l'électrode en cuivre par du carbone : la force électromotrice est un peu plus élevée (1,3 V).

Constituons une pile avec deux électrodes identiques, cuivre ou zinc (fig. 126) :

la force électromotrice est nulle.



**2° Influence de l'électrolyte.** — Changeons la concentration de l'électrolyte :

la force électromotrice est pratiquement inchangée.

Remplaçons l'acide par une solution basique : la force électromotrice est un peu inférieure à 1 V; enfin si l'on remplace *et l'électrolyte et les électrodes* on obtient une force électromotrice *différente*.

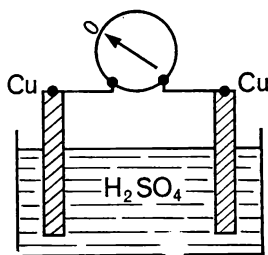


Fig. 126. — Les deux électrodes étant identiques, la force électromotrice est nulle.

**3° Conclusion.** — La force électromotrice d'une pile ne dépend pratiquement que de la nature des électrodes et de l'électrolyte qui la constituent.

Il ne peut y avoir de force électromotrice que si les électrodes sont différentes (nécessité d'une dissymétrie).

**4° Remarque.** — Quels que soient les produits utilisés la force électromotrice est au plus égale à 1,5 V.

#### 140. Résistance interne d'une pile.

**1° Rappel.** — Le courant débité par une pile dans une résistance est donné par la formule (24).

$$I = \frac{E}{R + r}$$

Pour une résistance externe  $R$  donnée et si la force électromotrice est constante, le courant ne dépend que de la résistance interne  $r$ . Si celle-ci augmente le courant diminue et inversement.

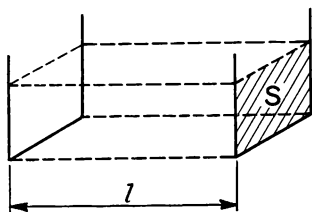
**2° Expérience.** — Écartons les électrodes d'une pile ou soulevons-les : le courant débité diminue, donc la résistance interne augmente.

Il en est de même si l'on remplace les électrodes par d'autres plus petites.

**3° Calcul de la résistance interne.** — La résistance interne est principalement due à la résistance de l'électrolyte.

Si les électrodes ont des formes quelconques nous ne pourrions pas calculer cette résistance.

Si les électrodes sont des plaques de métal (fig. 127), la résistance est égale à celle de l'électrolyte compris entre les deux plaques; on peut appliquer la formule :



$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Fig. 127. — La formule  $R = \frac{\rho l}{S}$  s'applique à la colonne de liquide.

4° **Remarque.** — Le calcul ci-dessus est également valable pour les cuves d'électrolyse et les accumulateurs.

5° **Résistivité des électrolytes.** — Elle dépend de la nature de l'électrolyte et de sa concentration. Retenons un ordre de grandeur :

0,01 à 1  $\Omega\text{m}$

Notons que la **résistivité** diminue quand la **température** augmente.

#### 141. Capacité d'une pile.

1° **DÉFINITION.** — La **capacité d'une pile** est la quantité totale d'électricité qu'elle peut fournir avant usure totale.

2° **Capacité théorique.** — Elle se calcule à partir de la masse des constituants de la pile.

Par exemple la pile de Volta consomme du zinc et de l'acide sulfurique. En admettant que l'acide soit en quantité suffisante la capacité ne dépend que du zinc.

Dans l'électrolyse 96 500 C déposent  $\frac{65}{2} = 32,5$  g de zinc.

Inversement dans une pile :

32,5 g de zinc peuvent fournir 96 500 C

3° **Capacité pratique.** — Elle est toujours inférieure à la précédente.

Elle est donnée en ampères-heures par le constructeur pour un débit raisonnable (décharge en quelques heures).

Dans les grosses piles usuelles la capacité peut atteindre une centaine d'ampères-heures.

## 142. Notion sur les piles thermo-électriques (1).

**1<sup>o</sup> Expériences.** — Fabriquons une pile (appelée aussi couple) thermoélectrique. Prenons un fil en fer et tordons chacune de ses extrémités avec un fil de constantan (fig. 128). On peut aussi *souder* ou *braser* les deux liaisons sans changer les phénomènes.

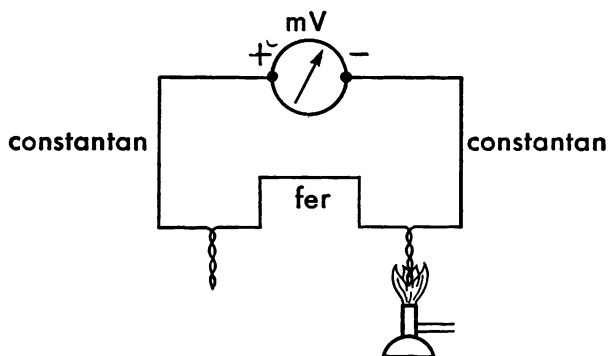


Fig. 128. — La différence de température des deux soudures crée une force électromotrice.

Chauffons une des liaisons et laissons l'autre froide, le millivoltmètre indique une différence de potentiel. Il y a donc une force électromotrice entre les deux fils de constantan.

**2<sup>o</sup> Conditions d'existence de la force électromotrice.** — a) Le fil du milieu doit être de *nature différente* des deux autres fils.

b) Il doit y avoir une *différence de température* entre les deux liaisons. L'une de celles-ci est appelée *soudure froide* et l'autre *soudure chaude*.

**3<sup>o</sup> Valeur de la force électromotrice.** — Elle dépend :

a) de la nature des métaux;

b) de la différence de température des soudures.

Avec le couple fer-constantan, la soudure froide à 0° et la chaude à 100°C on obtient 5 mV environ.

**4<sup>o</sup> Générateurs thermiques.** — Nous venons de réaliser un générateur qui transforme la chaleur en énergie électrique. Malheureusement, actuellement, dans les meilleures conditions, le rendement de la transformation n'atteint pas 0,5 %.

(1) Un développement plus complet est donné page 346 pour les classes de 1<sup>re</sup> F<sub>2</sub> et 1<sup>re</sup> F<sub>3</sub>.

5° **Usages.** — Les couples thermo-électriques permettent la mesure de températures élevées :

- jusqu'à 600 °C avec le couple cuivre-constantan;
- de 600 °C à 1 200 °C avec le couple alliage chromel (90 % de Ni, 10 % de Cr) et alliage alumel (95 % de Ni et 5 % Al);
- de 1 200 °C à 1 500 °C avec le couple platine - platine rodhié (90 % de Pt, 10 % de Rhodium).

Le couple utilisé est relié à un micro-ampèremètre que l'on gradue directement en degrés.

---

## PILES USUELLES

**143. Constitution de la pile Leclanché.**

1° **Description** (fig. 129). — L'électrolyte est une solution de chlorure d'ammonium  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

L'électrode positive est en carbone (charbon des cornues).

L'électrode négative est en zinc.

Autour du carbone on place du dioxyde de manganèse ( $\text{MnO}_2$ ) dont le rôle est d'oxyder l'hydrogène qui se forme (rôle dépolarisant).

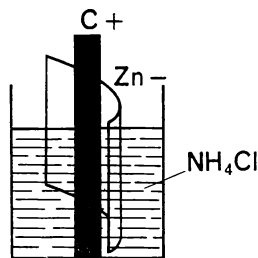


Fig. 129. — Pile Leclanché.

2° **Forme commerciale.** (fig. 130). — Avec son liquide la pile ne serait pas transportable. La pile du commerce, dite *pile sèche*, comporte du chlorure d'ammonium en gelée.

La pile la plus courante comporte trois éléments en série (4,5 V) (fig. 131).

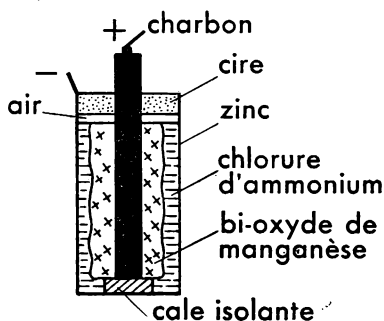


Fig. 130.

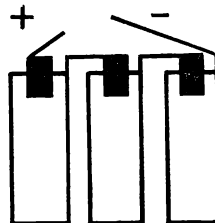


Fig. 131. — Pile courante  
3 éléments en série.

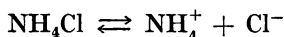
3° **Caractéristiques.** — *Force électromotrice*:  $e = 1,5 \text{ V}$ .

*Résistance interne*: Variable avec les dimensions, elle est de  $0,1 \Omega$  pour une pile moyenne.

*Capacité*: de 1 Ah pour la pile la plus courante à 100 Ah pour les grosses piles.

### 144. Principe de la pile Leclanché.

Le chlorure d'ammonium est dissocié en ions :

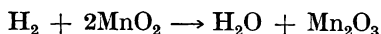


Les ions  $\text{Cl}^-$  provoquent l'ionisation des atomes de l'électrode en zinc :  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{++} + 2e^-$  et les électrons ainsi abandonnés chargent négativement cette électrode.

Quand le circuit extérieur est fermé ces charges négatives s'écoulent vers le carbone qui attirent les cations  $\text{NH}_4^+$ , ceux-ci sont déchargés et l'ammonium se décompose :



L'hydrogène formerait autour du carbone une gaine isolante et la pile serait polarisée s'il n'y avait pas de dioxyde de manganèse. Celui-ci fournit l'oxygène qui détruit l'hydrogène :



La pile peut théoriquement débiter jusqu'à usure totale du zinc. En fait le chlorure de zinc forme sur le zinc une couche qui, peu à peu, interdit l'accès à celui-ci des ions  $\text{Cl}^-$ . Avant d'être totalement « usée » la pile devient inutilisable.

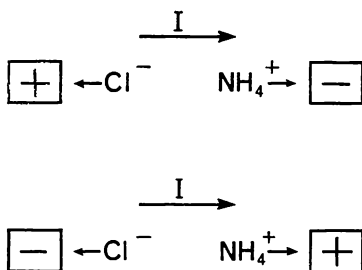


Fig. 132.

En haut : Électrolyse du chlorure d'ammonium.

En bas : Pile à chlorure d'ammonium.

### 145. Polarité et sens de courant.

1° **Polarité.** — Dans une électrolyse la polarité des électrodes est imposée et les ions se dirigent vers l'électrode de signe contraire (fig. 132).

Dans une pile, la polarité est fixée par la nature des électrodes; l'électrode négative est celle dont le métal a une plus grande tendance à l'ionisation <sup>(1)</sup>.

(1) Voir « Optique et Chimie » pour R. ANTOINE et J. NIARD (Masson et C<sup>ie</sup>, éditeurs).

**2° Sens de courant.** — Le sens (conventionnel) du courant est celui des charges positives. Il en résulte qu'à l'intérieur d'une pile le courant va du pôle (—) vers le pôle (+). Voir figure 132.

#### 146. Capacité d'un groupement de piles.

**1° Groupement en série.** — Toutes les piles débitent le même courant, elles fournissent donc la même quantité d'électricité. La capacité de plusieurs piles identiques en série est égale à la capacité de l'une d'elles.

**2° Groupement en parallèle.** — Le courant total est la somme des courants, il en est de même de la quantité d'électricité donc la capacité de plusieurs piles en parallèle est la somme des capacités.

#### 147. Autres piles.

**1° Pile Féry (fig. 133) :**

Électrodes : Charbon poreux (+) et zinc (—).

Électrolyte : Chlorure d'ammonium.

Dépolarisant : l'air pénètre dans le charbon poreux et oxyde l'hydrogène au fur et à mesure de sa formation.

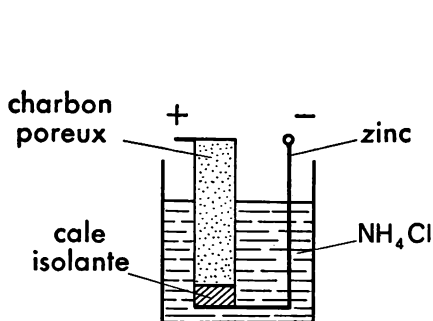


Fig. 133. — Pile Féry.

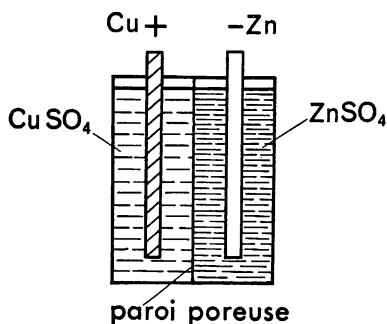


Fig. 134. — Pile Daniell.

## 2° Pile Daniell (fig. 134) :

Électrodes : Cuivre (+) et zinc (—).

Électrolyte : deux électrolytes séparés par une paroi poreuse : sulfate de cuivre dans lequel plonge le cuivre et sulfate de zinc dans lequel plonge le zinc.

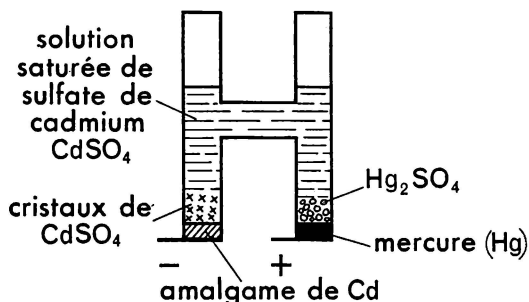


Fig. 135. — Pile Weston (croquis simplifié).



La pile Daniell est impolarisable, sa force électromotrice  $e = 1,07$  V est sensiblement constante.

Il y a consommation de zinc au pôle négatif et dépôt de cuivre au pôle positif.

## 3° Pile Weston (fig. 135) :

Électrodes : Mercure et sulfate mercurique (+).

Amalgame de cadmium (—).

Électrolyte : Solution saturée de sulfate de cadmium.

La pile est impolarisable et sert d'étalon de force électromotrice (fig. 136), celle-ci est de :

$$1,018\ 64\ \text{V à } 20\ ^\circ\text{C}$$

Fig. 136. — Pile étalon (Weston).

Photo AOIP.



## PROBLÈMES

**AVERTISSEMENT.** — Nous avons donné aux chapitres 20 et 21 un développement débordant largement le programme, aussi nous ne proposons qu'un nombre réduit de problèmes.

### I. AVEC SOLUTION.

**21. 01.** — Calculer la consommation théorique par ampère-heure d'une pile Leclanché pour les produits suivants : zinc, chlorure d'ammonium et bi-oxyde de manganèse.

— SOLUTION —

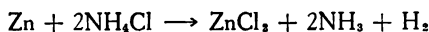
$$1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$$

Consommation de zinc :  $\text{Zn} = 65$  valence 2

$65/2 \text{ g}$  donnent  $96\,500 \text{ C}$

$$m_1 = 32,5 \times \frac{3\,600}{96\,500} = 1,21 \text{ g}$$

Consommation de chlorure d'ammonium :



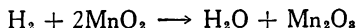
$$\text{Cl} = 35,5 \quad \text{N} = 14 \quad \text{H} = 1 \quad \text{NH}_4\text{Cl} = 53,5$$

$$m_2 = \frac{2 \cdot 53,5}{65} \times 1,21 = 2 \text{ g (environ)}$$

Masse d'hydrogène libéré :

$$m_3 = \frac{2}{65} \times 1,21 = 0,037 \text{ g}$$

Consommation de bi-oxyde :



$$\text{Mn} = 55 \quad \text{O} = 16 \quad \text{MnO}_2 = 87$$

$$m_4 = 2 \times \frac{87}{2} \times 0,0373 = 3,25 \text{ g}$$

**21. 02.** — Une pile Leclanché  $E = 1,5 \text{ V}$  a une résistance  $r = 0,5 \, \Omega$ . On lui fait débiter  $1 \text{ A}$  dans une résistance  $R$ . Après  $10 \text{ h}$  de fonctionnement elle est pratiquement usée. Calculer :

1° La valeur de  $R$ ;

2° La capacité utile de la pile;

3° La masse de zinc théoriquement consommée.

## — SOLUTION —

1°) Résistance R :

$$I = \frac{E}{R + r} \quad \text{soit} \quad 1 = \frac{1,5}{R + 0,5}$$

d'où

$$R = 1 \, \Omega$$

2°) Capacité :

$$Q = I t = 1 \times 10 = 10 \text{ Ah} = 36 \cdot 10^3 \text{ C}$$

3°) Masse de zinc

pour 96 500 C il faut 32,5 g

$$m = 32,5 \times \frac{36\,000}{96\,500} = 12,1 \text{ g}$$

II. A RÉSOUDRE.

**21. 03.** — Calculer la capacité utile d'une pile Leclanché fabriquée avec 100 g de zinc sachant que 60 % seulement de celui-ci sont utilisables. Combien faut-il de chlorure d'ammonium si 90 % de celui-ci est utilisé.

**21. 04.** — Une pile courante comporte 3 éléments Leclanché en série. Sa force électromotrice est 4,5 V et elle alimente pendant 4 h une ampoule consommant 0,2 A sous une différence de potentiel de 3,6 V. Calculer :

1° La chute de tension et la résistance interne de la pile;

2° La capacité de la pile;

3° L'énergie utile fournie.

## POLARISATION D'UN VOLTAMÈTRE

148. Expérience.

1° **Montage.** — Dans une cuve contenant de l'acide sulfurique dilué plaçons deux plaques de plomb reliées à un générateur.

2° **Constatations.** — a) Tant que l'interrupteur K est ouvert, le voltmètre ne dévie pas : *la cuve n'a pas de force électromotrice* (fig. 137).

b) Fermons l'interrupteur K sur la position 1 (fig. 138), le voltmètre et l'ampèremètre dévient dans le sens indiqué. *La cuve est le siège d'une électrolyse.*

c) Après quelques minutes ouvrons l'interrupteur K (fig. 139). Le générateur est donc « hors circuit », pourtant le voltmètre continue

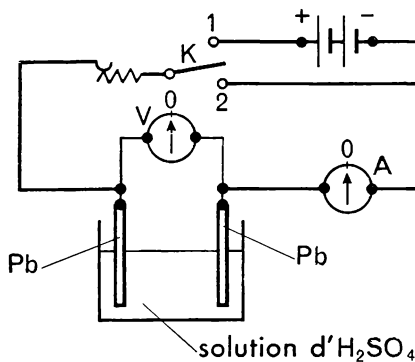


Fig. 137.

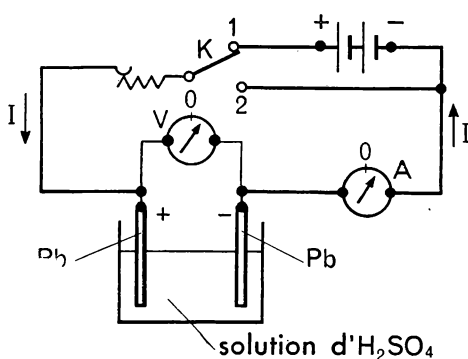


Fig. 138.

à dévier dans le même sens et indique 2 V environ. Il y a donc maintenant une *force électromotrice développée par le voltmètre.*

d) Plaçons l'interrupteur K en 2 (fig. 140). L'ampèremètre dévie à nouveau mais dans l'autre sens.

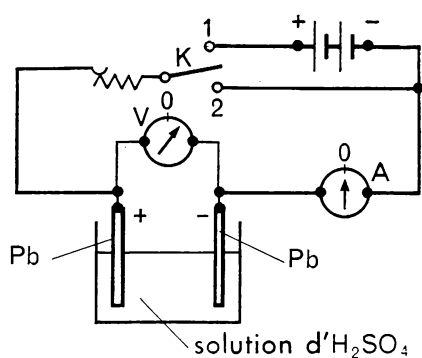


Fig. 139.

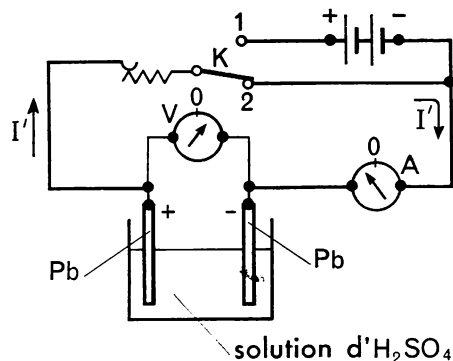


Fig. 140.

Le courant  $I'$  est fourni par le voltamètre puisque le générateur est toujours « hors circuit ».

D'ailleurs courant et tension diminuent rapidement et bientôt s'annulent.

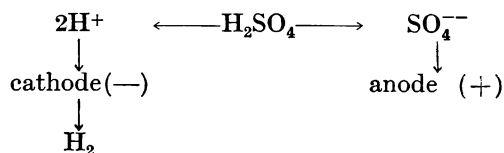
**149. Interprétation** (les alinéas ci-dessous correspondent à ceux du § 148 2°).

a) La cuve a une constitution symétrique :

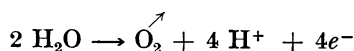


il est donc normal qu'elle ne développe aucune force électromotrice (§ 139, chap. 20).

b) Le générateur débite dans le circuit. Il y a électrolyse :



A l'anode on a la réaction du § 127 :



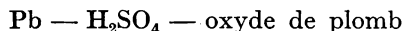
L'oxygène dégagé oxyde le plomb de l'anode.

Si l'on sort les électrodes on constate que :

— le plomb de l'anode a pris une coloration brune (chocolat) : il est oxydé en surface;

— le plomb de la cathode est devenu gris-ardoise : une partie de l'hydrogène a été retenue par le plomb.

c) La cuve possède une force électromotrice parce que sa constitution n'est plus *symétrique* :



on dit que le voltamètre s'est polarisé.

On remarquera que la polarité des électrodes est la même en *b*) et en *c*).

d) Le voltamètre est devenu *générateur*. Sa polarité étant inchangée le courant, lui, a changé de sens. Le débit dure peu car le voltamètre se dépolarise et lorsqu'il a repris sa constitution symétrique il ne possède plus de force électromotrice.

### 150. Voltamètre impolarisable.

Essayons de renouveler l'expérience avec un voltamètre à électrodes en cuivre et dont l'électrolyte est du sulfate de cuivre : nous échouons.

Il suffit de se reporter au chap. 18, § 127 pour expliquer cet échec : l'électrolyse dans ce cas se traduit par un transport de cuivre de l'anode à la cathode, *aucune dissymétrie n'apparaissant* il n'y a pas de polarisation.

### 151. Conséquences pratiques.

1<sup>o</sup> **Électrolyse.** — a) *Voltamètres polarisables.* — Dès qu'un courant les traverse ils se polarisent et opposent au passage du courant une force électromotrice. Cette force électromotrice étant *opposée* au passage du courant on l'a appelée *force contre-électromotrice*.

Ces voltamètres possèdent en outre une *résistance interne* principalement due à l'électrolyte (calculable comme au § 140), il faut donc leur appliquer la loi d'Ohm relative aux récepteurs développant une force contre-électromotrice (formule 25) :

$$U = E' + r'I$$

**REMARQUE.** — Le voltamètre étant symétrique au départ, le sens de la polarisation est imposé par celui du courant débité dans le circuit par le générateur.

b) *Voltamètres impolarisables.* — Ils ne possèdent jamais de force contre-électromotrice mais par contre ils possèdent toujours une résistance interne. Il faut donc leur appliquer la loi d'Ohm simple, celle des résistances pures (formule 13).

$$U = RI$$

2° **Accumulateurs.** — On peut donc fabriquer de nouveaux générateurs en polarisant les voltamètres polarisables. Ces générateurs fourniront de l'énergie en se dépolarisant, on pourra ensuite les « recharger » et ainsi de suite.

On a donné le nom d'accumulateurs à ces générateurs qui accumulent de l'énergie pendant la charge et peuvent la restituer ensuite.

C'est ainsi que, en répétant de nombreuses fois la polarisation et la dépolarisation décrites au début de la leçon, on arrive à modifier de plus en plus profondément les électrodes. Une énergie de plus en plus grande est emmagasinée dans le voltamètre qui devient ainsi un accumulateur. Cette méthode, due à Planté, forme des accumulateurs robustes mais très coûteux.

## **152. Mesure de la force contre-électromotrice.**

Nous savons que pour un récepteur à force contre-électromotrice la différence de potentiel est une fonction linéaire du courant et que  $U = E'$  quand  $I$  est nul (détermination graphique de  $E'$  § 113, chap. 16).

Nous pouvons connaître directement  $E'$  en mesurant la différence de potentiel entre les bornes du voltamètre quand celui-ci est polarisé. C'est ce que nous avons fait au § 148, figure 139.

## ACCUMULATEUR AU PLOMB (ACIDE)

### 153. Constitution.

1° **Plaque positive** (fig. 141). — Coulée en plomb pur, ses deux faces sont striées ce qui permet d'avoir une surface active égale à 8 fois la surface apparente.

Par voie électrochimique ce plomb est oxydé en peroxyde de plomb  $\text{PbO}_2$ . On obtient ainsi une plaque positive de couleur brun-chocolat, correspondant à l'accumulateur chargé.

2° **Plaque négative** (fig. 141). — Elle contient, entre deux grilles, du plomb pur spongieux logé dans des caissons. Elle correspond ainsi à l'accumulateur chargé.

3° **Électrolyte**. — C'est de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) dilué avec de l'eau pure. La densité de l'électrolyte doit être de 1,200 (24°Baumé) à la température de 20°C.

4° **Description d'un élément**. — Pour maintenir l'écartement et éviter le contact entre deux plaques de polarités différentes on place entre elles une planchette en bois (fig. 141).

Pour obtenir une plus grande capacité sans avoir un encombrement excessif chaque élément comporte plusieurs couples de plaques. Les plaques positives sont réunies entre elles et les plaques négatives également (fig. 142).

### 154. Théorie.

1° **Avertissement**. — Des nombreuses théories qui ont été proposées nous retenons celle qui est admise aujourd'hui et qui est d'ailleurs la plus simple : la théorie de la double sulfatation.

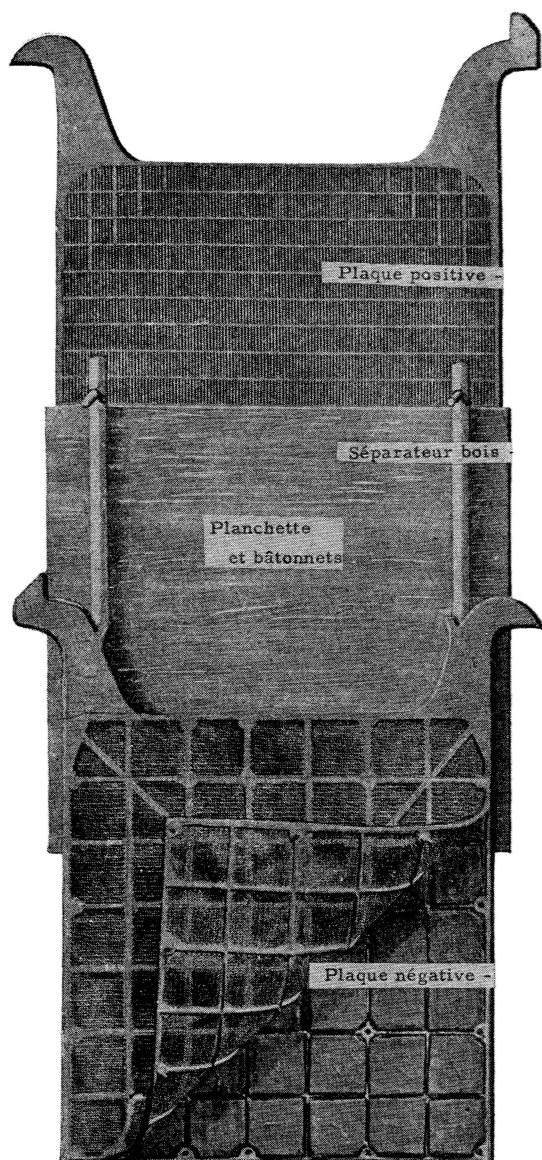


*Photo Tudor.*

**Fig. 141. — Constitution d'un accumulateur.**



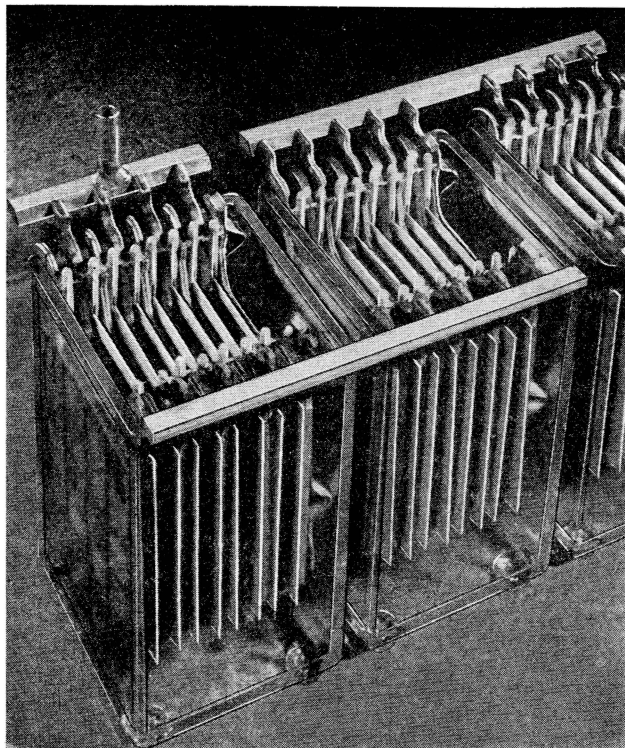
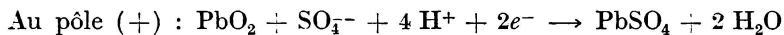
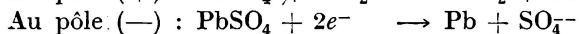
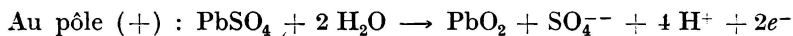


Photo Tudor.

Fig. 142. — Batterie d'accumulateurs montés.

**2° Décharge :**

On remarque que la décharge consomme de l'acide et produit de l'eau, il y a donc diminution de la concentration en acide.

**3° Charge :**

On remarque que la charge restitue l'acide précédemment consommé et au contraire consomme l'eau précédemment libérée.

**155. Étude pratique de la décharge.**

**1° Conditions de la décharge.** — Nous supposons que la batterie est initialement chargée totalement et que la décharge complète est effectuée en 10 h avec un courant constant.

**2° Force électromotrice** (fig. 143). — Elle décroît très vite au début de la décharge puis lentement de 2 V à 1,9 V jusqu'à la 9<sup>e</sup> heure pour décroître à nouveau rapidement en fin de décharge.

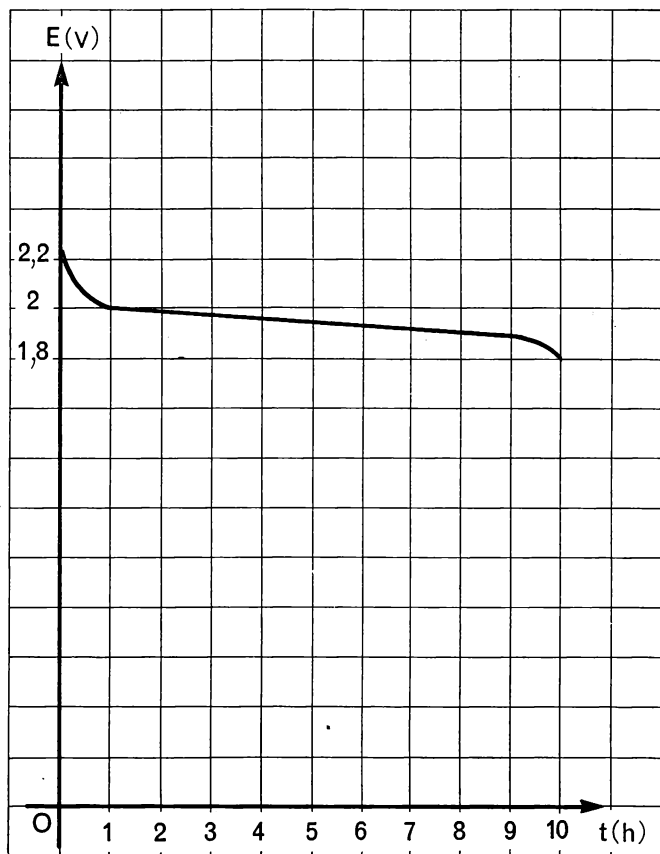


Fig. 143.

*La décharge consommant de l'acide, la concentration de ce dernier décroît pendant toute la durée de la décharge.*

**3° Indices de fin de décharge :**

— Force électromotrice : 1,8 V.

— Densité de l'électrolyte : 1,125 (16° Baumé).

(La densité de l'électrolyte se mesure avec un pèse-acide, fig. 144.)

— Couleur des plaques : positive, brun clair; négative, blanchâtre.

### 156. Étude pratique de la charge.

**1° Conditions de la charge.** — La batterie vient d'être déchargée selon les conditions précisées au § 155. La charge est effectuée en 10 h avec un courant constant égal à environ 115 % du courant de décharge.

**2° Force électromotrice** (fig. 145). — Elle croît très vite de 1,8 à 2,1 V puis lentement jusqu'à la 9<sup>e</sup> heure de 2,1 à 2,2 V pour croître à nouveau rapidement en fin de charge.

*La charge reconstituant l'acide la concentration de ce dernier croît pendant toute la durée de la charge.*

**3° Indices de fin de charge :**

— Force électromotrice : supérieure à 2,5 V.

— Densité de l'électrolyte : 1,200 (24° Baumé).

— Couleurs des plaques : positive, brun-chocolat; négative, gris-ardoise.

— De plus la fin de la charge se traduit par un important bouillonnement autour des plaques.

### 157. Caractéristiques.

**1° Force électromotrice.** — Nous savons qu'elle varie suivant l'état de charge. Nous pouvons retenir la valeur moyenne de 2 V.

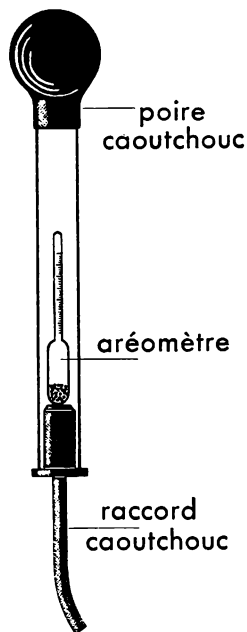


Fig. 144. — Pèse-acide pour batterie.

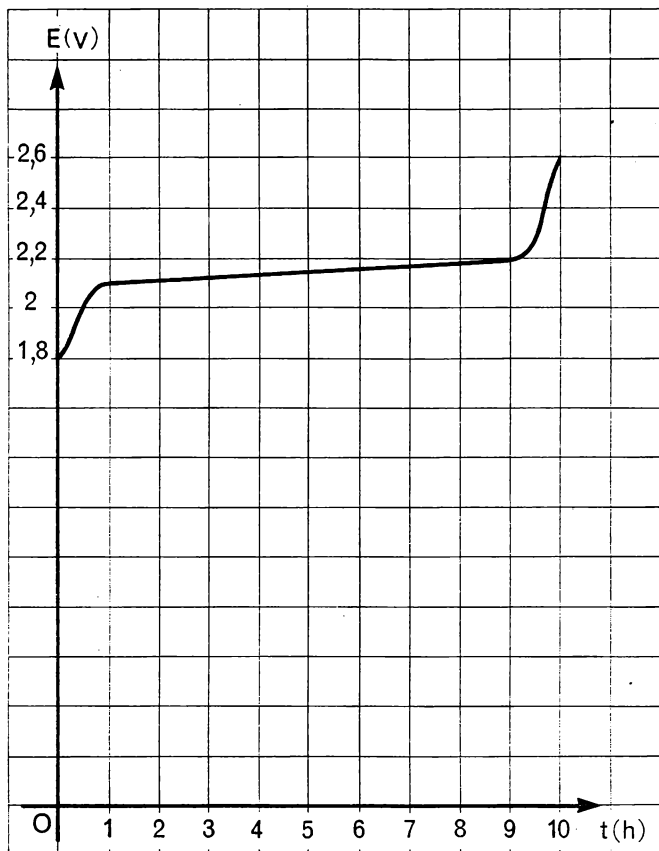


Fig. 145.

**2° Résistance interne.** — Elle est très faible et peut souvent être négligée. Elle est de  $1/100$  d'ohm ( $0,01 \Omega$ ) pour les plus petits accumulateurs et inférieure à  $1/1000$  d'ohm pour les plus gros.

**3° Capacité.** — a) *Définition.* — La capacité d'un accumulateur est la quantité totale d'électricité qu'il peut fournir en passant de l'état totalement chargé à l'état totalement déchargé.

b) *Variations de la capacité d'un élément.* — La capacité d'un élément dépend de la manière dont on l'utilise. Elle est d'autant plus petite que la décharge est plus rapide (voir tableau).

La capacité nominale correspond à une décharge en 10 h.

c) *Ordre de grandeur de capacité.* — De quelques ampères-heures pour les plus petits à plus de 20 000 Ah pour les plus gros. Une batterie d'automobile a une capacité d'une centaine d'ampères-heures.

d) *Intensité de décharge.* — Elle dépend de la durée de celle-ci. Pour un usage normal (décharge en 10 h) elle est égale à la capacité nominale divisée par 10 :  $I = \frac{Q}{10 \text{ h}}$ .

*Tableau donnant la capacité et l'intensité pour un accumulateur de 100 Ah (capacité nominale).*

| DURÉE<br>DE LA DÉCHARGE<br>(h) | CAPACITÉ<br>(Ah) | INTENSITÉ<br>(A) |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| 20                             | 114              | 5,7              |
| 10                             | 100              | 10               |
| 5                              | 86               | 17,2             |
| 3                              | 75               | 25               |
| 2                              | 66               | 33               |
| 1                              | 50               | 50               |

### 158. Rendements.

1° **Rendement en quantité.** — C'est le quotient de la quantité d'électricité restituée à la décharge par la quantité d'électricité absorbée pendant la charge.

$$\eta_q = \frac{\text{quantité utile}}{\text{quantité absorbée}} = \frac{Q_u}{Q_a}$$

Pour une utilisation normale (décharge en 10 h) le rendement atteint 90 %.

2° **Rendement en énergie.** — Rappelons-nous que l'énergie est donnée par la formule 8 (chap. 6) :

$$W = QU$$

Soit  $U$  la tension moyenne pendant la décharge, l'énergie utile est :

$$W_u = Q_u \times U$$

Soit  $U'$  la tension moyenne pendant la charge, l'énergie absorbée est :

$$W_a = Q_a \times U'$$

Le rendement énergétique est :

$$\eta_w = \frac{W_u}{W_a} = \frac{Q_u \times U}{Q_a \times U'}$$

$$\eta_w = \eta_a \frac{U}{U'}$$

Comme  $U$  est plus petit que  $U'$  (problème 23. 01) le rendement en énergie est plus petit que celui en quantité.

Il est de l'ordre de 75 %.

### 159. Qualités et entretien.

1° **Avantages.** — Force électromotrice sensiblement constante; résistance interne très faible; bons rendements.

2° **Inconvénients.** — Poids important; fragilité des plaques; ne supporte pas de court-circuit; sulfatation des plaques et mise hors d'usage en cas d'abandon prolongé; électrolyte dangereux; ne supporte pas de surcharge; entretien méticuleux.

3° **Entretien.** — Contrôle des niveaux de l'électrolyte et appoint d'eau distillée. Arrêt de la charge dès que le bouillonnement se manifeste.

**Maintien des accumulateurs à l'état chargé.**

*Un accumulateur déchargé, au repos, se détériore très vite et est définitivement hors d'usage après quelques semaines.*

## **PROBLÈMES**

### I. AVEC SOLUTION.

23. 01. — La résistance interne d'un accumulateur est  $0,005 \, \Omega$ . Sa force électromotrice pendant la décharge est  $1,95 \, \text{V}$  et sa force contre-électromotrice pendant la charge est  $2,15 \, \text{V}$ . Calculer :

1° La différence de potentiel entre les bornes de l'accumulateur pour un courant de 10 A :

a) Pendant la décharge; b) Pendant la charge.

2° Le courant de court-circuit de l'accumulateur et la puissance dissipée par effet joule pendant ce court-circuit.

— SOLUTION —

1° Différences de potentiel :

$$\begin{aligned} \text{a) Décharge : } U &= E - rI \\ &= 1,95 - 0,005 \times 10 \\ &= 1,9 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Charge : } U' &= E' + r'I \\ &= 2,15 + 0,005 \times 10 \\ &= 2,2 \text{ V} \end{aligned}$$

2° Courant de court-circuit :

$$I_{cc} = \frac{E}{r} = \frac{1,95}{0,005} = 390 \text{ A}$$

Pertes joules :

$$P_j = r I_{cc}^2 = 0,005 \times 390 \times 390 = 760,5 \text{ W}$$

**23. 02.** — Une batterie de 6 accumulateurs est chargée pendant 10 h sous une différence de potentiel moyenne de 14,4 V avec une intensité de 12 A. Pendant la décharge, la batterie débite un courant de 13 A sous une différence de potentiel de 12 V. Au bout de 8 h la décharge est totale. Calculer :

1° Les quantités d'électricité absorbée et utile et le rendement en quantité;

2° Les énergies absorbée et utile et le rendement en énergie.

— SOLUTION —

$$1^\circ \text{ Quantités d'électricité : } Q = It \begin{cases} I \text{ en ampères} \\ t \text{ en heures} \\ Q \text{ en A.h} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{a) absorbée : } Q_a &= 12 \times 10 \\ &= 120 \text{ Ah} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) utile : } Q_u &= 13 \times 8 \\ &= 104 \text{ Ah} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) rendement : } \eta_q &= \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{104}{120} \\ &= 0,867 = 86,7 \% \end{aligned}$$

2° Énergies :

$$W = QU \begin{cases} Q \text{ en A.h} \\ U \text{ en volts} \\ W \text{ en W.h} \end{cases}$$

a) absorbée :

$$W_a = 120 \times 14,4 = 1\,728 \text{ Wh}$$

b) utile :

$$W_u = 104 \times 12 = 1\,248 \text{ Wh}$$

c) rendement :

$$\begin{aligned} \eta_w &= \frac{W_u}{W_a} = \frac{1\,248}{1\,728} \\ &= 0,722 = 72,2 \% \end{aligned}$$

**23. 03.** — On veut charger avec un courant constant de 15 A une batterie de 24 accumulateurs. Au début de la charge la force contre-électromotrice d'un élément est 2,05 V, à la fin elle est de 2,3 V. La charge est effectuée sous une différence de potentiel constante  $U_G = 70 \text{ V}$ . La résistance d'un élément est 0,01  $\Omega$ . Calculer la résistance à mettre en série avec la batterie :

1° Au début de la charge;

2° A la fin.

## — SOLUTION —

1°) Début de charge :

Différence de potentiel de la batterie :

$$\begin{aligned} \text{pour 1 élément :} \quad U' &= E' + r'I \\ &= 2,05 + 0,01 \times 15 \\ &= 2,2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{pour 24 éléments :} \quad U'_t = 2,2 \times 24 = 52,8 \text{ V}$$

La résistance doit chuter :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_G - U'_t = 70 - 52,8 \\ &= 17,2 \text{ V} \end{aligned}$$

Valeur de la résistance :

$$R_1 = \frac{17,2}{15} = 1,15 \, \Omega \text{ environ}$$

2°) Fin de la charge : même solution :

$$\begin{aligned} U' &= E' + r'I \\ &= 2,3 + 0,01 \times 15 \\ &= 2,45 \text{ V} \\ U'_t &= 2,45 \times 24 = 58,8 \text{ V} \\ U_2 &= U_G - U'_t = 70 - 58,8 \\ &= 11,2 \text{ V} \\ R_2 &= \frac{11,2}{15} = 0,747 \, \Omega \end{aligned}$$



## II. AVEC RÉPONSES.

**23. 04.** — Un accumulateur a été chargé en 10 h sous une différence de potentiel de 2,2 V, avec un courant de 80 A. On lui fait débiter pendant 1 h un courant de 440 A. Il est alors totalement déchargé. Calculer :

1° La quantité d'électricité et l'énergie absorbée pendant la charge;

2° Le rendement en quantité;

3° La différence de potentiel moyenne à la décharge sachant que le rendement en énergie est de 42,5 %.

*Réponses :* 800 Ah ÷ 1 760 Wh : 55 % : 1,7 V.

**23. 05.** — Une batterie d'accumulateurs est utilisée en secours à raison de 1 h par jour. Elle débite alors un courant de 120 A. Quel courant de charge faut-il lui fournir pendant les 23 h restantes si son rendement en quantité est de 85 %?

*Réponse :* 6,14 A.

## III. A RÉSOUDRE.

**23. 06.** — Une batterie comporte 60 accumulateurs. Chaque accumulateur a une résistance de 0,002 Ω et une force électromotrice de 2,2 V pendant la charge et 2 V pendant la décharge. Calculer :

1° La différence de potentiel de la batterie quand elle débite un courant de 50 A;

2° La différence de potentiel pendant la charge avec un courant de 60 A.

**23. 07.** — En utilisant les valeurs du tableau donné au § 157, calculer les rendements en quantité de la batterie pour les différentes durées de décharge sachant que la quantité d'électricité fournie à la charge est de 120 Ah.

**23. 08.** — En utilisant les valeurs du tableau donné au § 157 et les résultats du problème 23. 07, calculer les rendements en énergie de la batterie pour les différentes durées de décharge, sachant que la tension de charge est toujours 2,2 V et que la tension moyenne de décharge est donnée par le tableau ci-dessous :

| DURÉE (h)           | 20 ÷ 10 ÷ 5 ÷ 3 ÷ 2 ÷ 1            |
|---------------------|------------------------------------|
| Tension moyenne (V) | 2 ÷ 1,95 ÷ 1,9 ÷ 1,85 ÷ 1,8 ÷ 1,75 |

**23. 09.** — Une batterie comporte 70 éléments. On veut obtenir une tension sensiblement constante de 126 V. La résistance interne est négligeable. La force électromotrice d'un accumulateur est :

2 V au début de la décharge; 1,8 V à la fin.

Combien faut-il utiliser d'éléments :

1° Au début de la décharge? 2° A la fin?

**23. 10.** — On veut charger une batterie de 60 accumulateurs ayant chacun une résistance interne de  $0,004 \Omega$  avec un générateur donnant une tension constante de 150 V. Quelle résistance faut-il mettre en série avec la batterie.

1° Au début de la charge sachant que l'intensité de charge est de 50 A et la force contre-électromotrice d'un élément 2,1 V?

2° A la fin de la charge sachant que l'intensité de charge est 20 A et la force contre-électromotrice d'un élément 2,2 V?

---

## ACCUMULATEUR AU CADMIUM-NICKEL (ALCALIN)

### 160. Constitution.

1° **Plaque positive** (fig. 146). — Composée d'étuis (ou de tubes) en feuillard d'acier finement perforé qui contiennent la matière active : l'hydroxyde de nickel.

2° **Plaque négative** (fig. 147). — Composée d'étuis en feuillard qui contiennent la matière active : l'hydroxyde de cadmium.

Les plaques, tant positive que négative, peuvent également être à support « fritté ».

3° **Électrolyte**. — C'est une solution de potasse à 20 %. Sa densité est 1,200 (24 °Baumé).

4° **Description d'un élément**. — Pour maintenir l'écartement et éviter le contact entre deux plaques de polarités différentes, on place entre elles une plaque en matière plastique (fig. 148).

Pour obtenir une plus grande capacité sans avoir un encombrement excessif chaque élément comporte plusieurs couples de plaques. Les plaques positives sont réunies entre elles et les plaques négatives également (fig. 149).

### 161. Théorie.

1° **Avertissement**. — Nous donnons la réaction globale, les réactions intermédiaires étant complexes et mal connues.

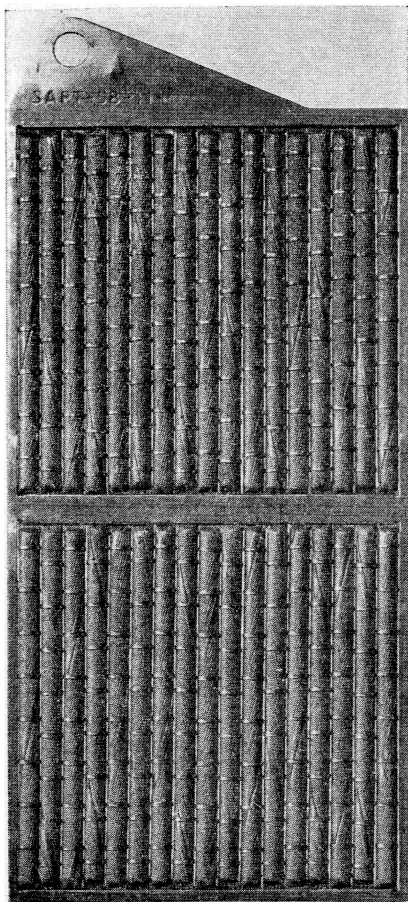


Photo SAFT.

Fig. 146. — Plaque positive (tubulaire).

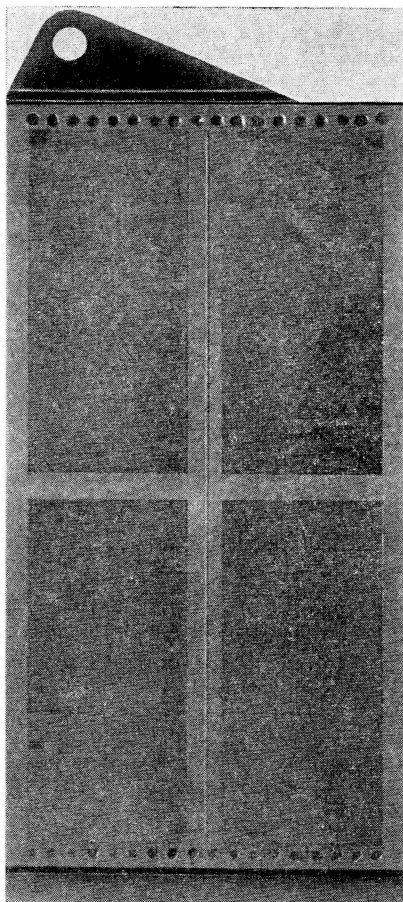
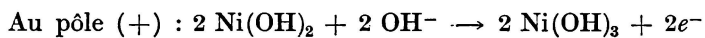


Photo SAFT.

Fig. 147. — Plaque négative (frittée).

### 2° Charge :



Tout se passe comme s'il y avait transfert de radicaux « oxhydrile » du p\^ole (—) au p\^ole (+).

On constate que l'\u00e9lectrolyte n'intervient pas. Sa concentration est donc inchang\u00e9e.

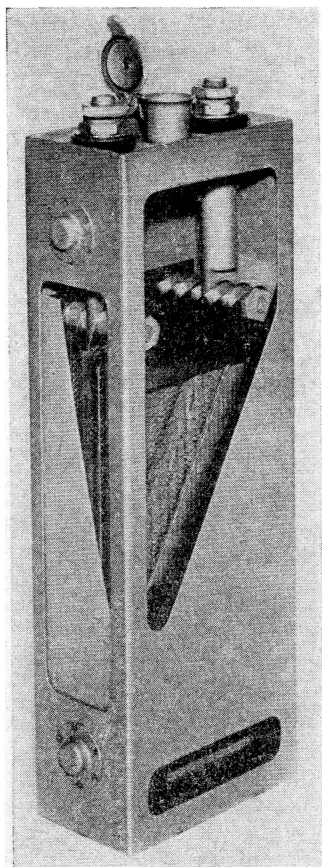


*Photo SAFT.*

Fig. 148. — Vue éclatée  
d'un accu au CdNi.

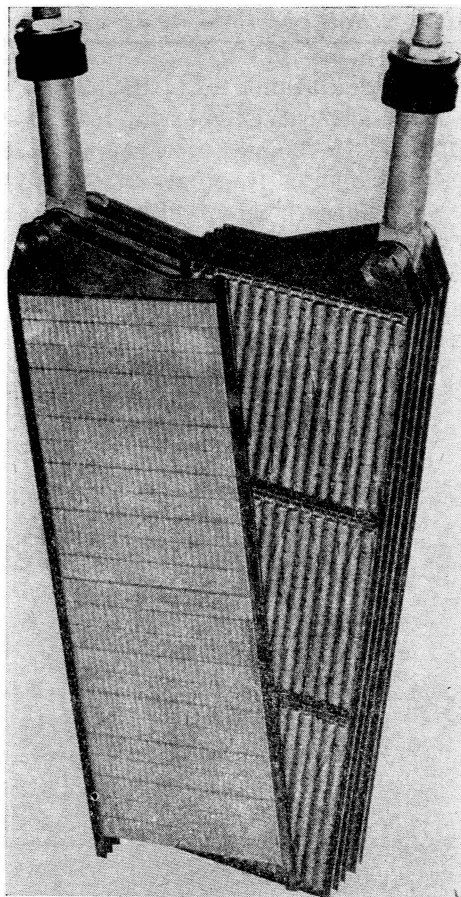


*Photo SAFT.*

Fig. 149. — Montage des plaques.

### 3° Décharge :

Au pôle (+) :  $2 \text{ Ni(OH)}_3 + 2e^- \rightarrow 2 \text{ Ni(OH)}_2 + 2 \text{ OH}^-$

Au pôle (—) :  $\text{Cd} + 2 \text{ OH}^- \rightarrow \text{Cd (OH)}_2 + 2e^-$

Tout se passe comme s'il y avait transfert de radicaux « oxhydrile »  
du pôle (+) au pôle (—).

La concentration de l'électrolyte est toujours inchangée.

### 162. Étude pratique de la décharge.

1° **Conditions de la décharge.** — Nous supposons que la batterie est initialement chargée totalement et que la décharge complète est effectuée en 5 h avec un courant constant.

2° **Force électromotrice.** — Elle décroît assez régulièrement de 1,35 V à 1 V environ, puis brusquement ensuite. Cette chute rapide de la force électromotrice est le seul indice de fin de décharge (fig. 150).

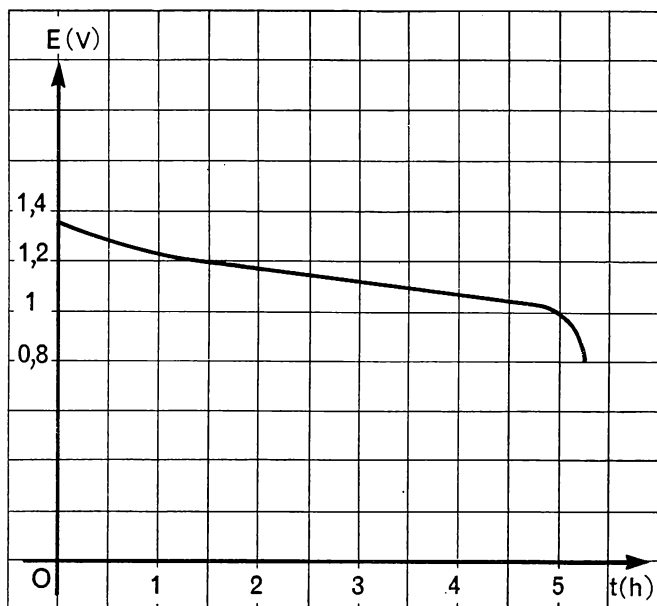


Fig. 150.

### 163. Étude pratique de la charge.

1° **Condition de la charge.** — La charge est effectuée en 7 h avec un courant identique à celui de la décharge ci-dessus.

2° **Force électromotrice.** — Pour les accumulateurs à plaques frittées elle croît lentement de 1,5 à 1,7 V (fig. 151, courbe 1).

Pour les accumulateurs à plaques perforées elle présente deux « sauts » de croissance rapide au cours de la charge (fig. 151, courbe 2).

**3° Indices de fin de charge.** — Seule la valeur de la force électromotrice indique que la charge est terminée. Le mieux est de respecter les conditions de charge précisées au 1°, la charge est alors terminée en 7 h.

A la fin de la charge la cuve est le siège d'un bouillonnement.

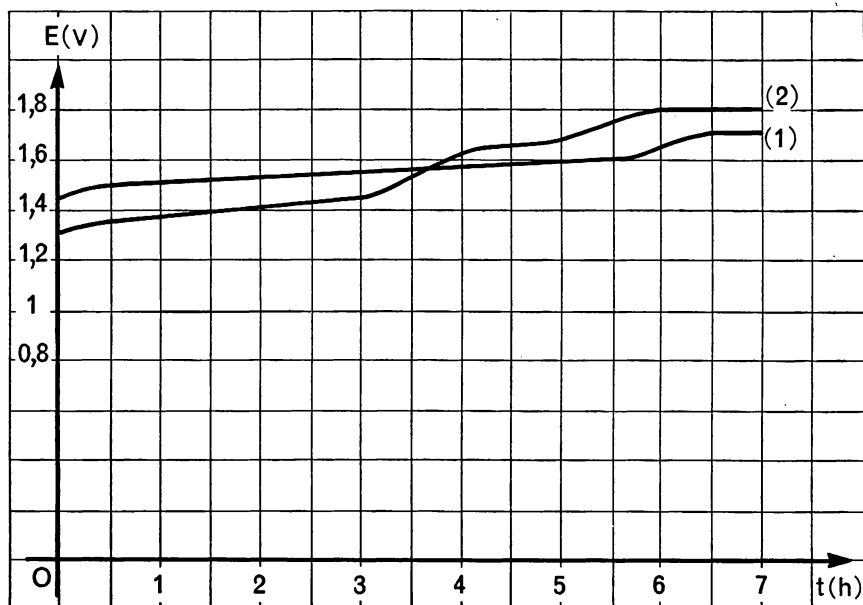


Fig. 151.

#### **164. Caractéristiques.**

**1° Force électromotrice.** — La valeur moyenne à la décharge est 1,2 V. Il faut donc 5 éléments pour obtenir 6 V (au lieu de 3 avec les accumulateurs au plomb).

**2° Résistance interne.** — Assez élevée avec les plaques perforées, elle est très faible avec les plaques frittées et comparable à la résistance des accumulateurs au plomb de même capacité : moins de 0,001  $\Omega$  pour un accumulateur de 100 Ah.

**3° Capacité.** — a) *Capacité nominale.* — Elle correspond à une décharge totale en 5 h.

b) *Variations de la capacité.* — La capacité utile diminue avec la durée de décharge mais très peu.

Pour une décharge en 2 h la capacité utile est égale à 90 % de la capacité nominale.

c) *Ordre de grandeur.* — De 0,1 Ah à quelques milliers d'ampères-heures.

d) *Intensité de décharge.* — Elle est sensiblement égale à la capacité nominale divisée par la durée de décharge puisque la capacité est pratiquement invariable.

## **165. Rendements.**

**1° Rendement en quantité :**

$$\eta_q = \frac{Q_u}{Q_a}$$

Puisque pour un même courant la charge dure 7 h et la décharge 5 h, le rendement est :  $\frac{5}{7} = 0,714 = 71,4 \%$ .

**2° Rendement en énergie :**

$$\eta_w = \frac{Q_u \times U}{Q_a \times U'}$$

Tension moyenne de décharge  $U$  : 1,2 V environ.

Tension moyenne de charge  $U'$  : 1,6 V

D'où la valeur moyenne de  $\eta_w$  :

$$\eta_w = 0,714 \times \frac{1,2}{1,6} = 0,535$$

Soit 53 % environ.

## **166. Qualités et entretien.**

**1° Avantages.** — Robuste; poids assez faible; électrolyte moins dangereux que l'acide sulfurique; capacité sensiblement constante; peut rester déchargé pendant des mois sans inconvénient; grande longévité; entretien réduit.



**2° Inconvénients.** — Prix élevé; force électromotrice faible et assez variable; rendements moyens.

**3° Entretien.** — Adjonction d'eau distillée pour compléter les niveaux.

**REMARQUE.** — On fabrique aujourd'hui des accumulateurs au cadmium-nickel complètement étanches qui ne nécessitent d'autre entretien que celui d'être rechargés. Il en existe de toutes capacités et de toutes tensions, certains ont un volume comparable à celui des piles sèches et peuvent les remplacer.

### 167. Usages des accumulateurs.

*Ce paragraphe concerne aussi bien les accumulateurs au plomb que ceux au cadmium-nickel.*

Les accumulateurs sont utilisés pour l'alimentation des centraux téléphoniques; les stations émettrices de radio; les commandes de sécurité (aiguillage, centrales...); l'éclairage de secours (Administrations, usines, cinémas, hôpitaux, grands magasins, centrales électriques, écoles, etc.)

Ils sont une source électrique auxiliaire sur les navires, pour l'éclairage des trains et l'aviation.

En outre chaque automobile possède une batterie d'accumulateurs pour le démarrage et l'éclairage à l'arrêt.

## **PROBLÈMES**

*Pour les problèmes rédigés et les problèmes avec réponses on se reportera à ceux du chapitre 23.*

### III. A RÉSOUDRE.

**24. 01.** — Un accumulateur au cadmium-nickel est chargé pendant 6 h avec un courant constant de 15 A sous une tension de 1,7 V. A la décharge il fournit pendant 5 h un courant de 13 A sous une tension de 1,2 V. Calculer :

- 1° Les quantités d'électricité absorbée et utile;
- 2° Les énergies absorbée et utile.
- 3° Les rendements en quantité et en énergie.

**24. 02.** — Un accumulateur au cadmium-nickel a une force électromotrice de 1,25 V et une résistance interne de 0,005  $\Omega$ . Sa capacité est de 100 Ah. Calculer :

- 1° Son courant de court-circuit;
- 2° L'intensité qu'il fournit si on le décharge totalement à courant constant en 5 h;
- 3° La quantité d'électricité nécessaire à la recharge si le rendement en quantité est 70 %.

**24. 03.** — Une batterie de secours est utilisée 6 h par semaine. On lui demande alors un courant de 100 A. Le reste du temps elle est rechargée en permanence par un courant dit d'entretien. Quelle doit être l'intensité de ce courant si le rendement en quantité est de 60 %.

**24. 04.** — Une batterie au cadmium-nickel comporte 10 éléments ayant chacun une résistance de 0,05  $\Omega$ . Pendant la charge la force contre-électromotrice est 1,6 V par élément et le courant 6 A. La charge dure 12 h. Pendant la décharge la force électromotrice est de 1,3 V, le courant 5 A et la décharge dure 10 h. Calculer :

- 1° La différence de potentiel de charge, la quantité d'électricité absorbée et l'énergie correspondante;
  - 2° La différence de potentiel, la quantité d'électricité et l'énergie restituées pendant la décharge;
  - 3° Les rendements en quantité et énergie.
-

## LE CHAMP MAGNÉTIQUE

### 168. *Aimants naturels et artificiels.*

Depuis des siècles on connaît l'existence de substances capables d'attirer des petits morceaux de fer ou de la limaille : ces substances sont des oxydes de fer, en particulier l'oxyde magnétique ou magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); ce sont des aimants naturels (fig. 152).



Fig. 152. — Aimant naturel attirant de la limaille.

En frottant toujours dans le même sens (fig. 153) un morceau d'acier de forme allongée, avec un aimant naturel on obtient un nouvel aimant : c'est un aimant artificiel.

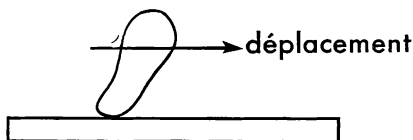


Fig. 153. — Aimantation d'un morceau d'acier.

Le même résultat peut être obtenu plus commodément en utilisant un courant électrique pour aimanter.

### 169. *Propriétés des aimants.*

**1<sup>o</sup> Boussole.** — La boussole est un aimant léger monté sur un axe. Placée loin de tout aimant (et de tout courant électrique) elle s'oriente toujours sensiblement dans la même direction : la direction Nord-Sud géographique. Mieux, si l'on repère ses deux extrémités, on constate que c'est toujours la même qui est dirigée vers le Nord : on a naturellement appelé **pôle Nord** de la boussole cette

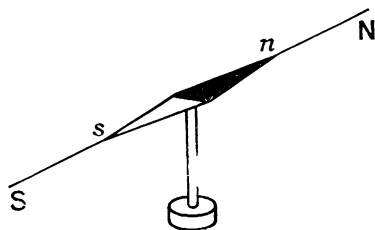


Fig. 154. — La boussole indique le Nord

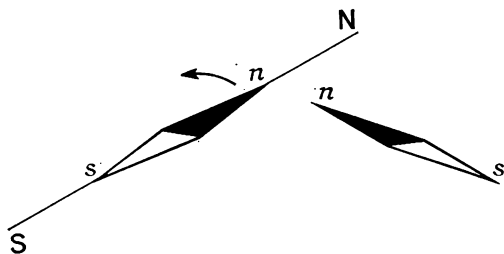


Fig. 155. — Deux pôles Nord se repoussent.

extrémité, l'autre est appelé pôle Sud (fig. 154).

**2° Action réciproque de deux aimants.** — Repérons également les 2 extrémités d'une seconde boussole et approchons, de son pôle Nord, le pôle Nord de la première (fig. 155) : il y a répulsion. De la

même façon on constate que deux pôles l'un Nord et l'autre Sud s'attirent :

- deux pôles de même nom se repoussent;
- deux pôles de noms contraires s'attirent.

Grâce à cette propriété nous pouvons avec une boussole identifier les pôles de n'importe quel aimant.

**3° Action sur les corps non aimantés.** — Avec un aimant cherchons à attirer diverses substances, certaines sont attirées par l'aimant quel que soit le pôle présenté, ces substances seront dites **magnétiques**, la liste en est très limitée : le fer, le cobalt, le nickel et certains de leurs composés et alliages.

Les autres substances ne subissent aucune attraction : cuivre, bois, matières plastiques, etc.

**4° Aimantation par influence.** — Plaçons un clou en fer à l'extrémité Sud d'un aimant : l'extrémité libre du clou attire le pôle

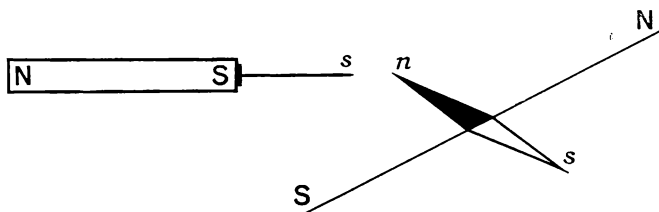


Fig. 156. — Au contact de l'aimant le clou s'aimante.

Nord d'une boussole (fig. 156). Sous l'influence de l'aimant ce clou est devenu aimant à son tour : il s'est aimanté par l'influence.

Retirons l'aimant, la boussole n'est plus attirée : le clou a perdu son pouvoir. L'aimantation du fer disparaît quand disparaît la cause de cette aimantation (fig. 157), **l'aimantation du fer est temporaire.**

Recommençons l'expérience avec une aiguille en acier après

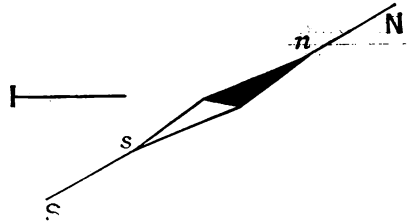


Fig. 157. — Seul, le clou n'a plus d'action.

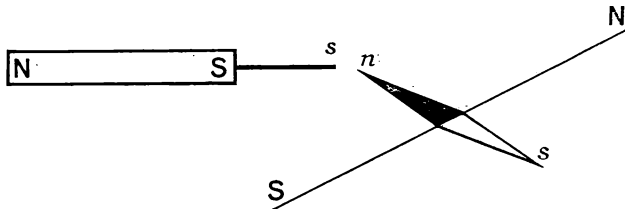


Fig. 158. — Au contact de l'aimant l'aiguille s'aimante.

avoir vérifié au préalable qu'elle était sans effet sur la boussole.

Comme pour le clou l'extrémité libre de l'aiguille (fig. 158) attire le pôle Nord de la boussole mais elle continue de l'attirer, plus faiblement d'ailleurs, quand l'aimant est retiré (fig. 159), l'aimantation de l'acier est **permanente.**

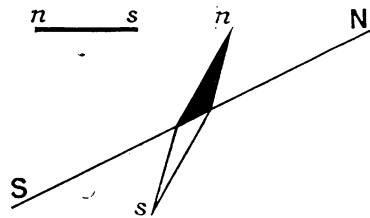


Fig. 159. — L'aiguille conserve une partie de son aimantation.

**5<sup>e</sup> Expérience de l'aimant brisé.** — Partageons en deux un aimant, perpendiculairement à son grand axe, en espérant ainsi séparer le pôle Nord du pôle Sud : cet espoir est déçu, chaque demi-aimant est

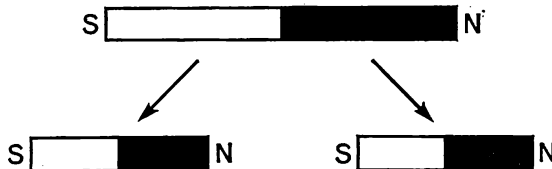


Fig. 160. — En brisant un aimant on obtient deux nouveaux aimants.

devenu aimant à son tour avec un pôle Nord et un pôle Sud. Si l'on poursuivait le partage on ne réussirait pas davantage : **il est impossible d'isoler un pôle d'aimant** (fig. 160).

## 170. *Champ magnétique.*

1<sup>o</sup> **Existence.** — Laissons une boussole s'orienter librement suivant la direction Nord-Sud et approchons de son pôle Nord un pôle Sud d'aimant dans la direction perpendiculaire à celle de l'aiguille. A grande distance, 2 m par exemple, la boussole est indifférente à la présence de l'aimant; puis au fur et à mesure que l'on s'approche on voit son pôle Nord se tourner vers le pôle Sud de l'aimant et enfin lorsque l'on est

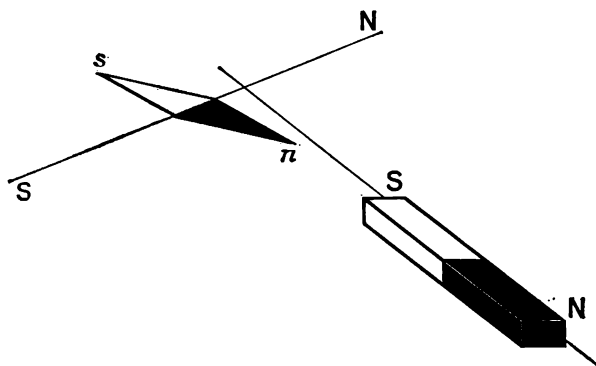


Fig. 161. — L'influence de l'aimant croît quand il se rapproche.

très près de la boussole son axe est pratiquement dans le prolongement de celui de l'aimant. Nous déduirons de cette expérience (fig. 161) que :

- l'influence de l'aimant est d'autant plus grande que sa distance à la boussole est plus petite.
- à grande distance l'aimant n'agit plus.

2<sup>o</sup> **DÉFINITION.** — On appelle **champ magnétique** de l'aimant l'espace situé autour de l'aimant et dans lequel il fait sentir son influence.

3<sup>o</sup> **Spectre magnétique.** — L'expérience du paragraphe précédent ne nous donne qu'une très vague idée de ce qu'est un champ magnétique.

L'utilisation de limaille de fer va nous permettre une « matérialisation » de ce champ magnétique.

Sur un carton fort, ou mieux sur une plaque en verre, saupoudrons de la fine limaille de façon régulière et plaçons la plaque sur un aimant droit; en tapotant légèrement pour faire sauter la limaille nous voyons celle-ci se déplacer et se répartir en lignes allant d'un pôle à l'autre. Si,

de plus, nous plaçons au hasard quelques petites aiguilles aimantées, appelées magnétomètres, nous constatons que ces aiguilles se placent partout suivant la direction de la tangente à la ligne de limaille (fig. 162).

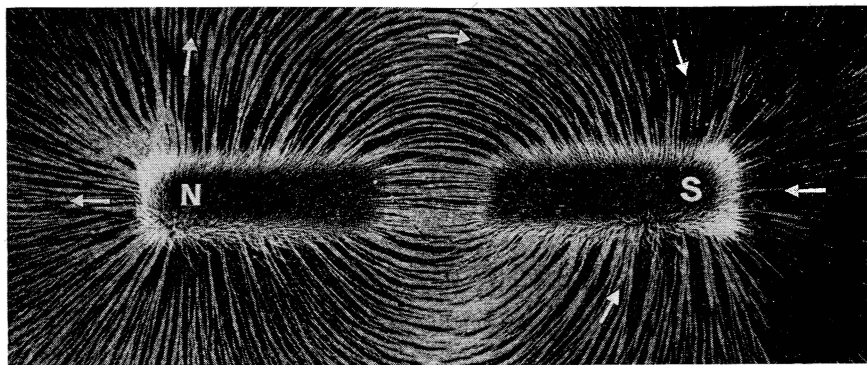


Fig. 162. — *Champ magnétique d'un aimant droit.*

Les lignes matérialisées par la limaille ont reçu le nom de **lignes de force** (ou de champ, ou d'induction). Leur ensemble constitue le **spectre magnétique** de l'aimant.

### 171. Propriétés des lignes de force.

1<sup>o</sup> Si l'on pouvait placer un pôle Nord isolé en un point d'une ligne de force, il se déplacerait en suivant cette ligne dans le sens indiqué

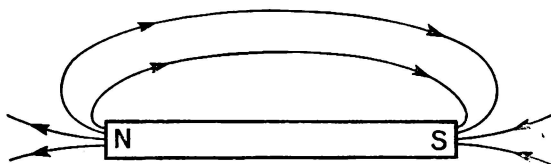


Fig. 163. — *Les lignes de force sont orientées du Nord vers le Sud à l'extérieur de l'aimant.*

par les magnétomètres puisqu'il serait repoussé par le pôle Nord de l'aimant et attiré par le Sud.

**CONSÉQUENCE.** — Nous orienterons les lignes de force du Nord vers le Sud à l'extérieur de l'aimant (fig. 163).

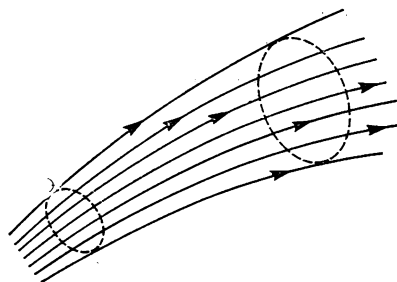


Fig. 164. — Tube de force de lignes divergentes.

4° Dans l'espace un faisceau de lignes de force forme un **tube de force** (fig. 164). A travers un tube de force le nombre de lignes est constant. En effet, si une ligne « sortait » du tube, au point de sortie il y aurait deux lignes : celle qui limite le tube et celle qui sort, ce qui est contraire au 2°.

On peut tenir le même raisonnement pour une ligne qui « entrerait » dans le tube.

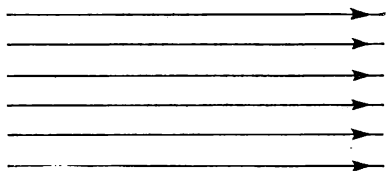


Fig. 166. — Champ uniforme.

lèles. On dit alors que le champ magnétique est uniforme (fig. 166).

2° En un point il passe une ligne de force et une seule. S'il y en avait deux il y aurait deux orientations possibles pour une aiguille aimantée ce qui est démenti par l'expérience.

**CONSÉQUENCE. — Deux lignes de force ne se coupent jamais.**

3° Il y a une infinité de lignes de force, les lignes de limailles n'en matérialisent que quelques-unes.

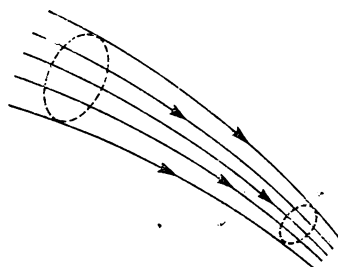


Fig. 165. — Tube de force de lignes convergentes.

5° Si le tube a une section croissante les lignes de force *divergent* (fig. 164), dans le cas contraire elles *convergent* (fig. 165).

6° Si le tube a une section constante les lignes de force sont parallèles.

## 172. Autres spectres d'aimants.

La figure 167 donne le spectre d'un aimant en fer à cheval. Entre les pôles de l'aimant le champ est sensiblement uniforme.

La figure 168 donne le spectre de deux aimants droits; pôles de noms



contraires en regard et la figure 169 celui de deux aimants droits pôles de même nom en regard.

On remarquera que les propriétés magnétiques sont surtout localisées aux extrémités des aimants.

### 173. Champ magnétique des courants.

1<sup>o</sup> Nous savons déjà qu'une aiguille aimantée, placée sous un conducteur, dévie

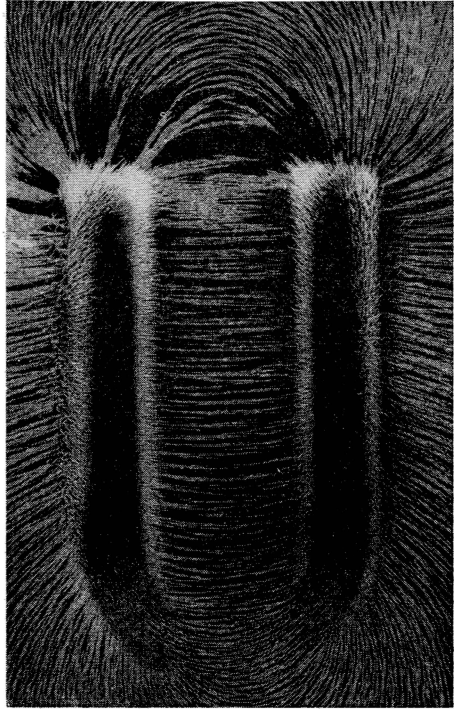


Fig. 167.

Fig. 167. — Spectre d'un aimant en fer à cheval.

Fig. 168. — Pôles de même nom en regard. On voit qu'entre les pôles les lignes de force se « repoussent ».

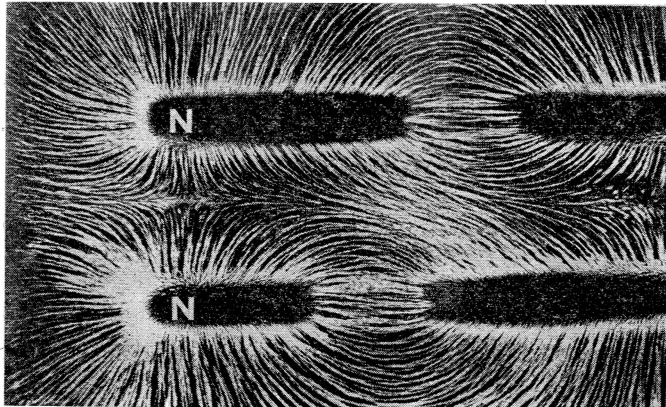


Fig. 168.

lorsque celui-ci est parcouru par un courant (§ 23). Autour d'un courant électrique il y a donc un champ magnétique.

2° L'expérience montre qu'il n'y a aucune différence entre les propriétés des champs magnétiques des courants et ceux des aimants. Tout se passe comme si le champ magnétique avait « oublié son origine ».

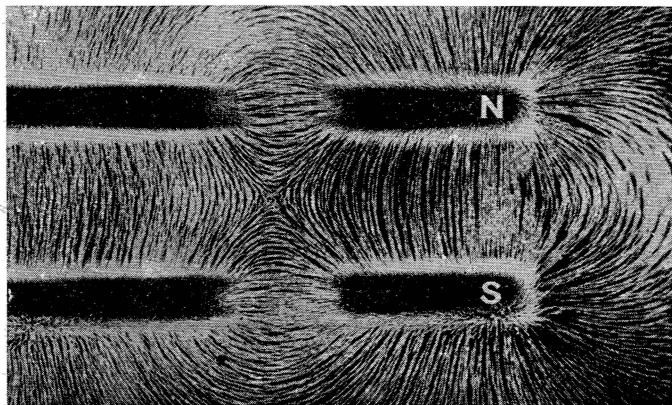


Fig. 169. — Pôles des noms contraires en regard. Entre les deux pôles le champ est sensiblement uniforme, comme celui d'un aimant en fer à cheval.

#### 174. Champ d'un courant rectiligne.

Pour explorer le champ on fait traverser un plateau horizontal à un fil vertical et on saupoudre le plateau avec de la limaille (il faut un courant important pour obtenir un spectre net : environ une cinquantaine d'ampères dans un seul fil) (fig. 170).

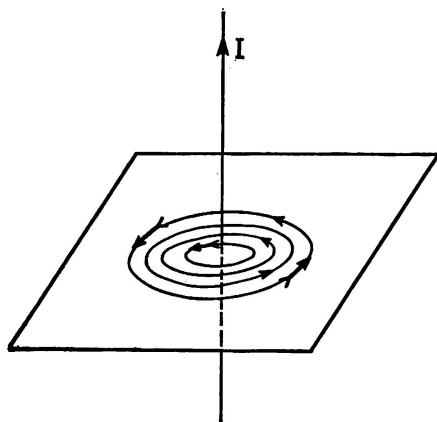


Fig. 170. — Champ d'un courant rectiligne.

1° **Forme du spectre.** — La limaille se dispose en cercles concentriques au fil. Le champ est de révolution autour du fil.

2° **Sens du champ.** — Quelques aiguilles aimantées nous indiquent le sens des lignes de force.

Pour trouver ce sens il existe plusieurs règles pratiques.

**3<sup>o</sup> Règle n° 1, du bonhomme d'Ampère.** — Le sens des lignes de force est tel qu'un observateur, placé le long du fil de façon que le courant lui entre par les pieds et lui sorte par la tête, voit les lignes orientées vers sa gauche (fig. 171).

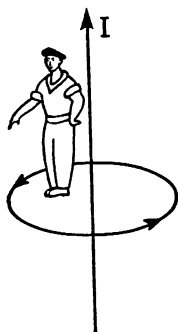


Fig. 171.  
Règle du bonhomme  
d'Ampère.

**4<sup>o</sup> Règle n° 2, de la main droite.** — La main droite entourant le fil de façon que le pouce indique le sens du courant le sens des lignes de force est donné par l'orientation des autres doigts (fig. 172).

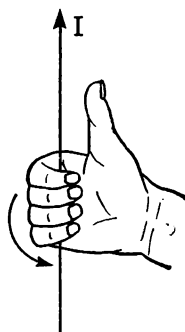


Fig. 172.  
Règle de la main  
droite.

**5<sup>o</sup> Règle n° 3, du tire-bouchon de Maxwell.** — Le sens des lignes de force est celui dans lequel il faut faire tourner un tire-bouchon pour qu'il progresse dans le sens du courant (fig. 173).

On peut remplacer le tire-bouchon par une vis normale (à droite). Nous retiendrons la règle n° 3 qui est d'un emploi commode et universel.

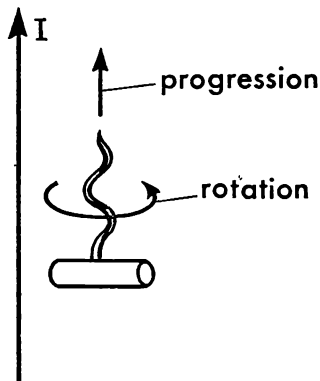


Fig. 173. — Règle du tire-bouchon  
de Maxwell.

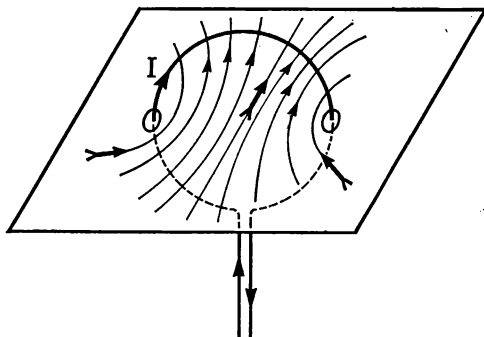


Fig. 174. — Champ d'un courant  
circulaire.

### 175. Champ d'un courant circulaire.

Pour explorer le champ on dispose un plateau horizontal dans le plan diamétral de la spire (fig. 174).

1° **Forme du spectre.** — a) Vers le centre de la spire les lignes de force sont pratiquement des droites.

b) En se rapprochant des points où la spire coupe le plan les lignes se courbent de plus en plus.

c) Autour des traversées du plan on voit des courbes fermées qui sont des cercles à peine déformés.

2° **Sens des lignes de force.** — Quelques aiguilles aimantées nous donnent le sens : les règles 1 et 2 s'appliquent directement, la règle 3 s'adapte ainsi : **le sens des lignes de force est celui dans lequel progresse un tire-bouchon que l'on fait tourner dans le sens du courant.**

3° **Faces de la spire.** — Le pôle Nord de la boussole se dirige vers la face qui est vers nous : c'est une **face Sud** puisqu'elle attire le pôle Nord de l'aiguille (fig. 175).

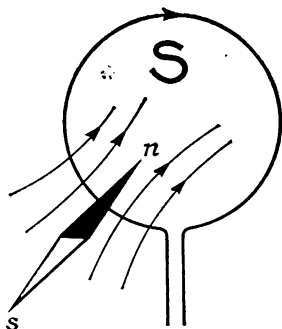


Fig. 175. — Le pôle Nord est attiré par la face Sud.

Un moyen facile et amusant pour trouver sans erreur le nom d'une face est d'inscrire dans celle-ci, celles des deux lettres **N** ou **S** qui a les flèches dans le sens du courant (fig. 176).

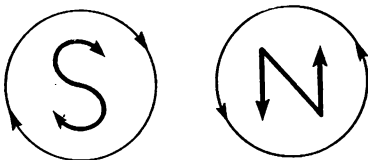


Fig. 176. — Repérage des faces d'une bobine.

## 176. Champ d'une bobine longue (solénoïde).

1° **Forme des lignes** (fig. 177). — a) A l'intérieur, ce sont des lignes parallèles à l'axe de la bobine sauf au voisinage des fils où ce sont des cercles à peine déformés parce que les spires ne sont pas jointives. **Le champ intérieur est donc sensiblement uniforme.**

b) A l'extérieur, le spectre est identique à celui d'un aimant droit.

2° **Sens.** — On le trouve comme pour une spire, en particulier avec la troisième règle.

3° **Faces.** — On les différencie comme pour une spire.

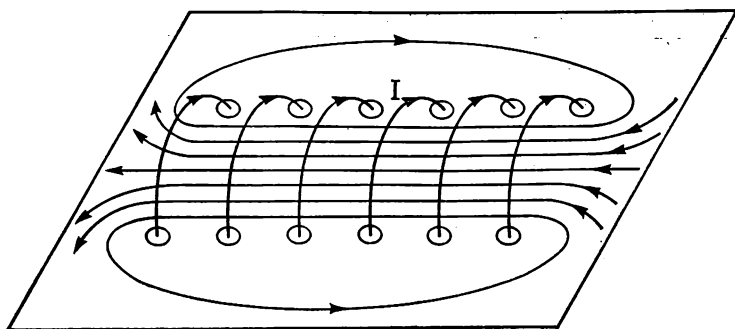


Fig. 177. — Champ d'une bobine longue.

### 177. Champ d'une bobine en forme de tore.

**1<sup>o</sup> Forme des lignes.** — Ce sont des cercles concentriques sauf au voisinage des fils où l'on retrouve des petits cercles déformés lorsque les spires ne sont pas jointives (fig. 178).

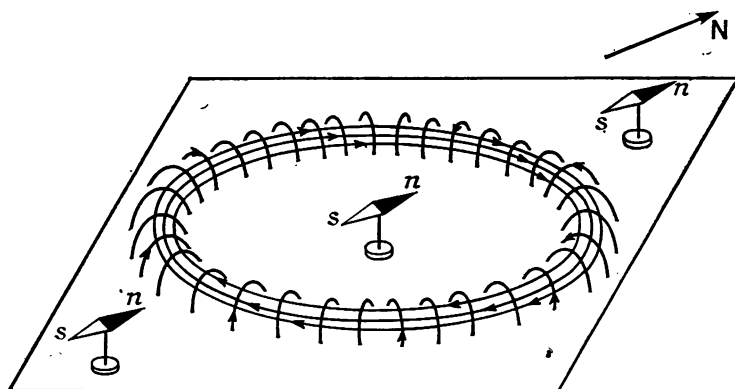


Fig. 178. — Champ magnétique d'une bobine en forme de tore.  
Le champ étant nul à l'extérieur, les aiguilles aimantées indiquent le Nord.

**2<sup>o</sup> Sens.** — Donné par la troisième règle.

**3<sup>o</sup> Faces.** — La bobine n'a plus de face, les faces de chaque spire étant neutralisées par les faces des spires voisines. D'ailleurs des magnétomètres placés autour de la bobine conservent la direction Nord-Sud géographique.

### 178. Théorie moderne du magnétisme des aimants.

1° On sait que dans les corps les électrons sont en perpétuelle « rotation » autour du noyau de leur atome.

Raisonnons sur un électron. L'électron en se déplaçant engendre un courant de sens inverse équivalent à celui d'une spire circulaire, ce courant est appelé courant particulaire, il crée un champ magnétique (fig. 179).

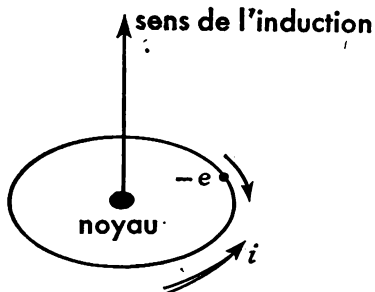


Fig. 179.

Fig. 179. — L'atome est équivalent à courant circulaire.



Fig. 179 bis.

Fig. 179 bis. — Dipôle équivalent à un atome.

Chaque atome est donc équivalent à un petit aimant appelé **dipôle magnétique** (fig. 179 bis).

Tant que le corps n'a subi aucune influence magnétique ces dipôles ont toutes les orientations possibles et leurs actions se détruisent : le corps n'a aucune propriété magnétique (fig. 180).

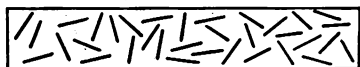


Fig. 180. — Les dipôles ne sont pas orientés.



Fig. 181. — Les dipôles sont orientés.

— ou les dipôles peuvent s'orienter sous l'action du champ, le matériau est magnétique et le corps devient aimant à son tour (fig. 181).

Si les dipôles gardent leur orientation quand on supprime le champ excitateur le magnétisme est permanent, sinon il est temporaire.

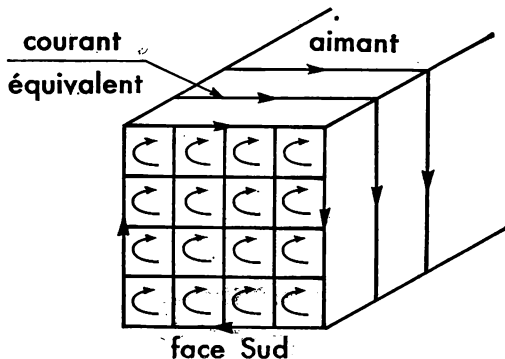


Fig. 182. — L'aimant droit est équivalent à un solénoïde.

**2° Cas de l'aimant droit.** — Les dipôles s'orientent dans le sens de la longueur. Tous les courants particuliers détruisent leurs effets deux à deux sauf ceux de la périphérie, finalement **l'aimant droit est équivalent à une bobine longue ce qui explique l'identité des champs à l'extérieur et permet de supposer qu'à l'intérieur d'un aimant droit le champ est analogue à celui d'un solénoïde** (fig. 182).

3° On s'explique maintenant qu'il y ait identité entre les champs des courants et ceux des aimants. En réalité ils ont tous une même origine : un courant électrique.

### 179. Induction $\vec{B}$ .

1° En chaque point d'un champ magnétique, l'action de celui-ci matérialisée par l'orientation du magnétomètre, a donc :

a) *Une direction.* — L'axe du magnétomètre qui est aussi la tangente à la ligne de force.

b) *Un sens.* — Celui indiqué par le magnétomètre.

Les effets d'un champ magnétique étant orientés, nous devons les mesurer en chaque point par une **grandeur vectorielle**, cette grandeur est appelée induction magnétique ou simplement **induction ( $\vec{B}$ )**.

2° **Éléments du vecteur induction en un point** (fig. 183). —

a) *Direction (ou support).* — La tangente à la ligne de force qui passe par le point considéré (ce point est naturellement l'origine du vecteur).

b) *Sens.* — Il est indiqué par le magnétomètre, induction et ligne de force sont donc orientés dans le même sens.

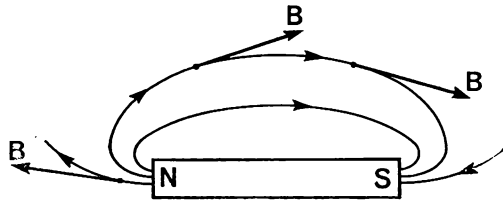


Fig. 183. — Le vecteur induction est tangent à la ligne de force et orienté comme elle.

c) *Mesure (ou module).*

— La valeur de l'induction en un point dépend :

- de la source de champ magnétique;
- de la position du point par rapport à cette source.

Nous mesurerons l'induction par la force qu'elle développe sur un fil rectiligne parcouru par un courant électrique.

### 180. Unité d'induction.

1° Le tesla (T). — Le tesla est l'induction qui, de direction perpendiculaire à un fil rectiligne de 1 mètre de longueur traversé par un courant de 1 ampère, développe sur ce fil une force de 1 newton (fig. 184).

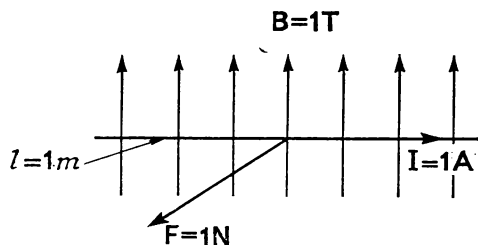


Fig. 184. — L'unité d'induction est le tesla.

2° Remarque. — Il est pratiquement impossible d'avoir une induction constante de 1 T sur une longueur de 1 m, par contre cela est réalisable sur quelques centimètres, quand nous

saurons comment varie la force avec la longueur du fil nous préciserons comment on mesure l'induction en pratique.

2° Le tesla est une unité assez grande, il existe un sous-multiple qui autrefois était l'unité principale : le gauss (G), retenons :

$$1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G} = 10^4 \text{ G}$$

#### 4° Ordres de grandeur d'induction.

Aimant artificiel :

0,1 T

Pôle de machine électrique :

1 T à 2 T

Composante horizontale du champ terrestre :  $20 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 0,2 \text{ G}$



## FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

### 181. Interactions électromagnétiques.

**1<sup>o</sup> Expérience historique d'Oersted.** — Une aiguille aimantée placée sous un fil parcouru par un courant électrique dévie : elle se met en croix avec le fil.

Cette expérience a été signalée dans le chapitre 3 paragraphe 23.

Nous sommes maintenant en mesure de préciser l'orientation de l'aiguille : celle des lignes de force, donnée par la règle du bonhomme d'Ampère (fig. 185).

Le courant électrique développe donc des forces sur les matériaux aimantés. Inversement si le fil était mobile et l'aiguille fixe c'est le fil qui dévierait.

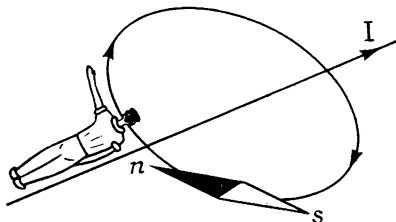


Fig. 185. — Expérience d'Oersted.

**2<sup>o</sup> Autres expériences.** — Un aimant attire ou repousse un pôle d'un autre aimant, il peut aussi attirer ou repousser un pôle d'une bobine parcourue par un courant électrique (fig. 186).

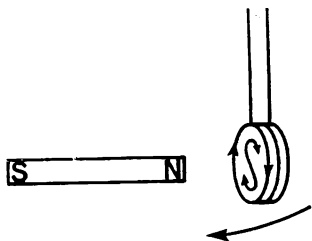


Fig. 186. — L'aimant attire la bobine.

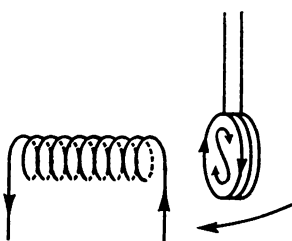


Fig. 187. — La bobine attire la bobine.

De même une bobine parcourue par un courant peut attirer ou repousser l'un des pôles, soit d'un aimant, soit d'une autre bobine (fig. 187).

**3° Interprétation.** — Puisque l'aimantation d'un aimant est due à des courants particuliers toutes ces expériences sont en fait des aspects différents d'un même phénomène : l'action d'un courant sur un courant, cette action se produisant par l'intermédiaire des champs magnétiques développés par ces courants.

**4°** Les forces développées dans ces expériences sont dites **électromagnétiques**.

Pour trouver l'expression permettant de calculer la force électromagnétique nous nous placerons dans un cas simple : un champ uniforme agissant sur un conducteur rectiligne.

### 182. Étude qualitative de la force électromagnétique.

**1° Expériences.** — Plaçons un fil conducteur, rectiligne, rigide, relié à une source par des fils souples, entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval et faisons varier les conditions de l'expérience comme suit :

a) Si le conducteur n'est pas traversé par un courant, il ne se passe rien (fig. 188).

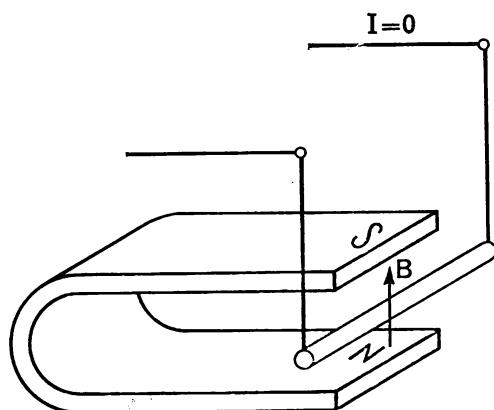


Fig. 188. — Dispositif d'étude de la force électromagnétique.

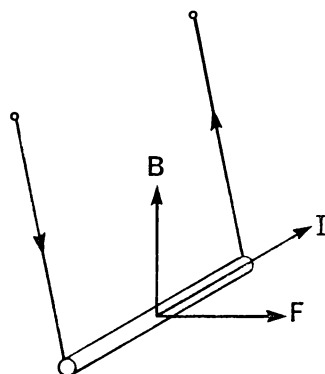


Fig. 189. — Le conducteur dévie vers la droite.

b) Si un courant passe dans le sens indiqué, le conducteur dévie vers la droite (fig. 189).

c) Invertissons le sens du courant (fig. 190), le fil dévie vers la gauche.

d) Rétablissons le sens initial du courant et inversons les pôles de l'aimant, le fil dévie vers la gauche (fig. 191).

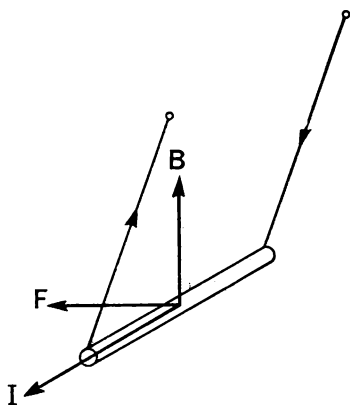


Fig. 190. — Le sens de la force change avec celui du courant.

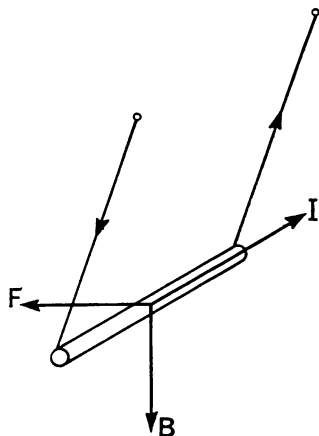


Fig. 191. — Le sens de la force change avec celui de l'induction.

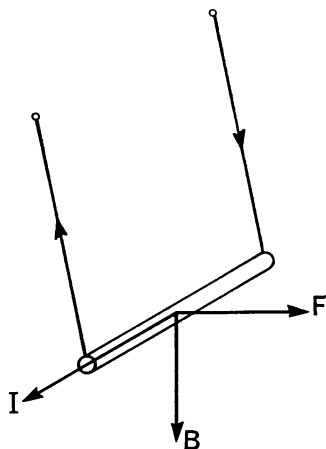


Fig. 192. — Si B et I changent simultanément de sens, F est inchangé.

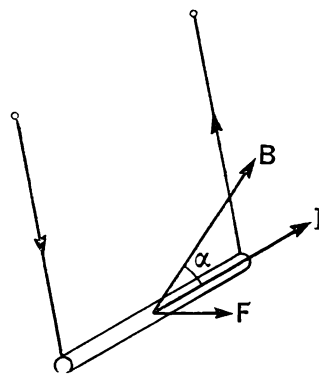


Fig. 193. — Quand B et I ne sont plus perpendiculaires la force est plus faible.

e) Invertissons à nouveau le courant en laissant l'aimant comme en d, le fil dévie vers la droite (fig. 192).

f) Replaçons-nous dans le cas b, pôle Nord en bas et courant de l'avant vers l'arrière, le fil dévie à nouveau vers la droite; inclinons

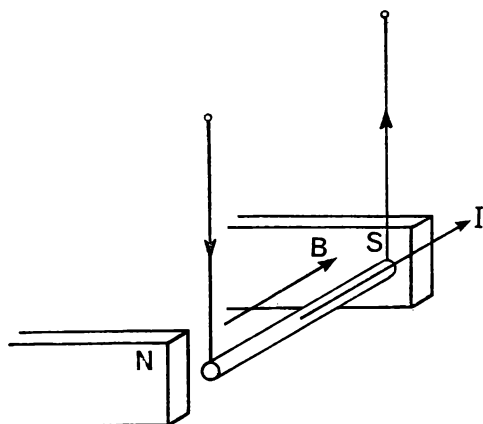


Fig. 194. — La force est nulle quand  $B$  et  $I$  sont parallèles.

l'aimant de façon que l'induction qu'il produit ne soit plus perpendiculaire au fil : au fur et à mesure que l'inclinaison augmente la déviation du fil diminue nous en déduisons que la force développée par le champ diminue (fig. 193); enfin, si l'induction est parallèle au fil, la déviation est nulle; la force l'est donc aussi (fig. 194).

**2° Direction de la force électromagnétique.** — La force électromagnétique est normale (perpendiculaire) au

plan défini par la direction du courant et celle de l'induction (fig. 195). Son point d'application est le milieu de la portion de conducteur soumise au champ.

**3° Sens de la force.** — Il dépend du sens du courant et de celui de l'induction. Pour retrouver ce sens d'une façon commode nous retiendrons la **règle des trois doigts de la main droite**.

On fait correspondre les trois premiers doigts et les trois grandeurs, force (sens du déplacement), intensité et induction de la façon suivante :

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| pouce-force      | index-intensité |
| majeur-induction |                 |

on retient facilement cette correspondance par le moyen suivant, la grandeur est donnée par les premières lettres du nom du doigt :

|            |           |           |
|------------|-----------|-----------|
| ce         | dex       | jeur      |
| <b>POU</b> | <b>IN</b> | <b>MA</b> |
| sse        | tensité   | gnétisme  |

On peut aussi remarquer qu'à l'ordre naturel des doigts correspond l'ordre alphabétique des grandeurs :

|              |                  |                   |
|--------------|------------------|-------------------|
| <b>Force</b> | <b>Intensité</b> | <b>Magnétisme</b> |
|--------------|------------------|-------------------|

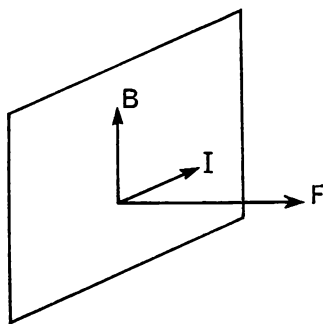


Fig. 195. — La force est perpendiculaire au plan  $(B I)$ .

Les trois doigts doivent être perpendiculaires entre eux et former un trièdre tri-rectangle. On dirige les doigts correspondant aux deux grandeurs connues, le troisième donne direction et sens de la troisième grandeur (fig. 196).

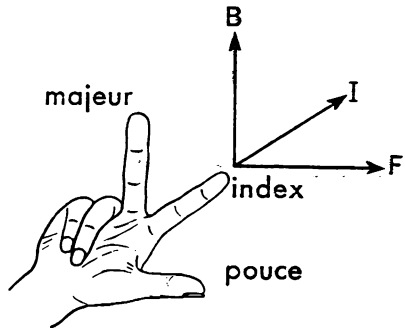


Fig. 196. — Règle des trois doigts de la main droite.

### 183. Étude quantitative - Loi de Laplace.

Reprenons le système aimant-conducteur du paragraphe précédent et faisons varier les facteurs dont peut dépendre la force électromagnétique.

**1<sup>o</sup> Intensité du courant.** — Quand l'intensité du courant augmente la force augmente.

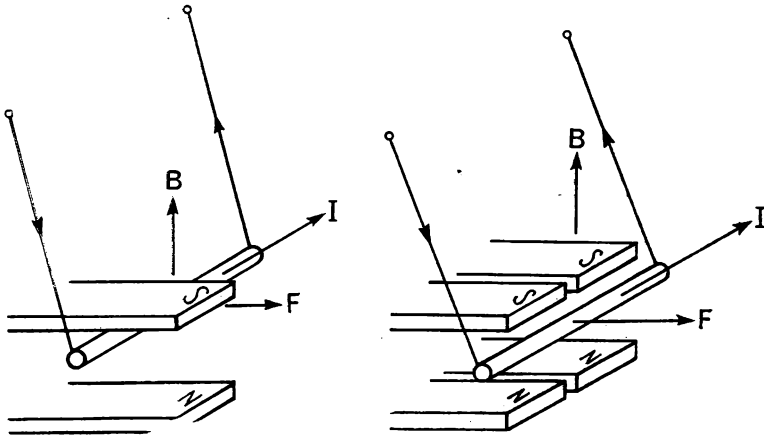


Fig. 197. — La force est proportionnelle à la longueur de fil soumise à l'induction.

**2<sup>o</sup>** Plaçons un aimant étroit, puis deux aimants étroits identiques côte à côte : la force est plus grande dans le second cas or, si les deux aimants sont identiques, l'induction est la même qu'avec un seul, c'est la *longueur* du fil soumise à l'induction *qui a augmenté* : quand la longueur du fil soumise à l'induction augmente la force augmente (fig. 197).

3° Si l'on remplace un aimant par un autre « plus fort » (capable de soulever de plus gros morceaux de fer), c'est-à-dire développant une induction plus grande, la force augmente.

4° Enfin nous avons vu que la force dépendait de l'inclinaison de l'aimant donc de l'angle formé par  $\vec{B}$  et  $\vec{I}$ .

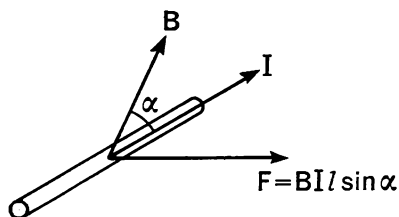


Fig. 198. — Loi de Laplace.

Des mesures précises ont permis de rassembler toutes ces constatations dans une seule loi.

5° **Loi de Laplace.** — La force électromagnétique développée sur un fil rectiligne est proportionnelle :

- à l'induction magnétique;
- à l'intensité du courant qui traverse le fil;

— à la longueur de ce fil;

— au sinus de l'angle  $\alpha$  formé par l'induction et le fil (fig. 198).

(29)

$$F = BI l \sin \alpha$$

$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ en teslas} \\ I \text{ en ampères} \\ l \text{ en mètres} \\ F \text{ en newtons} \end{array} \right.$

#### 184. Mesure des inductions.

1° **Balance de Cotton.** — La balance de Cotton (fig. 199 et 200) a deux bras égaux. L'un d'eux comporte un fil rectiligne court, CD, qui est la **partie active** sur laquelle agira l'induction à mesurer.

L'action de la force électromagnétique sur CD rompt l'équilibre de la balance, celui-ci est rétabli par le poids des masses marquées que l'on place sur le plateau porté par le second bras. A l'équilibre ce poids est égal à la force. Dans le modèle photographié  $CD = 2 \text{ cm}$  et le courant maximal peut atteindre 10 A pendant quelques secondes (1).

2° **Calcul de l'induction.** — a) Nous placerons toujours CD perpendiculairement à  $\vec{B}$  :

$$\alpha = 90^\circ \quad \sin \alpha = 1 \quad F = BI l$$

(1) En surcharge seulement car le courant permanent maximal est 7 A.

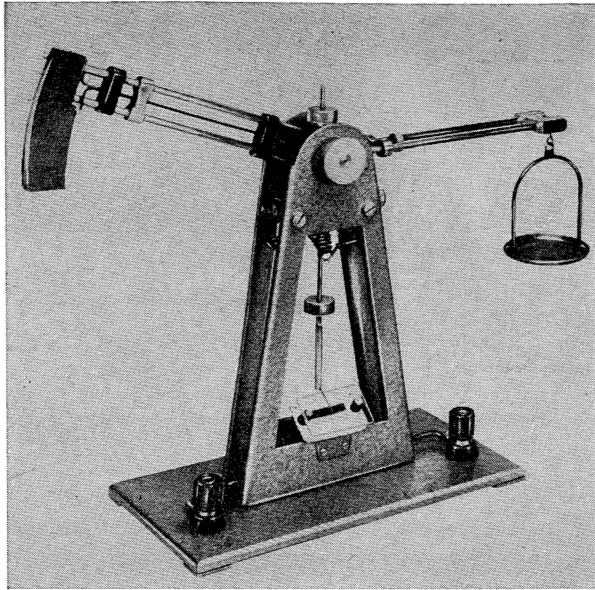


Photo AOIP.

Fig. 199. — Balance de Cotton.

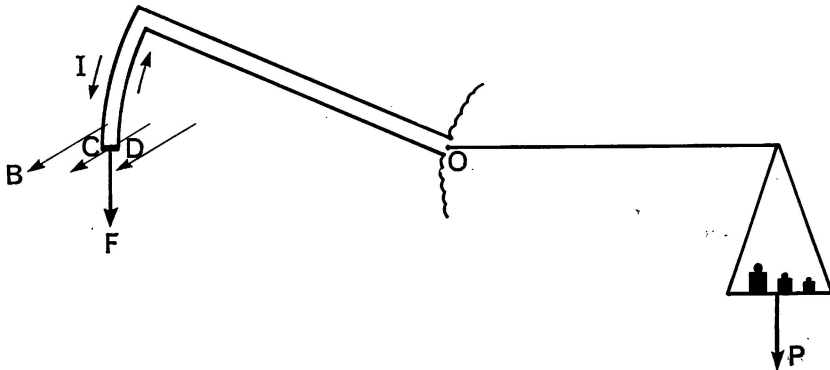


Fig. 200. — Balance de Cotton schématisée.

b) La force est mesurée par le poids  $P$  des masses  $M$  :

$$F = P = Mg = 10 M \quad \text{en prenant} \quad g = 10 \text{ m/s/s}$$

c) Pour  $I = 10 \text{ A}$  et  $l = 2 \text{ cm}$  on a :

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{10 M}{10 \cdot 0,02} = 50 M$$

d) Exprimons la masse en grammes, soit :

$$M' \text{ (grammes)} = 10^3 \cdot M \text{ (kilogrammes)}$$

$$B = 50 M' 10^{-3} = \frac{M'}{20}$$

L'induction en tesla est égale au vingtième de la masse en grammes. La balance étant sensible à 5 milligrammes on peut donc détecter des inductions de :

$$B = \frac{0,005}{20} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 2,5 \text{ G}$$

## PROBLÈMES

### I. — AVEC SOLUTION.

**26. 01.** — Un fil rectiligne de 10 cm de longueur, parcouru par un courant de 5 A, est placé dans une induction de 0,4 T. Calculer la force électromagnétique qui s'exerce sur le fil :

1° Quand le fil est perpendiculaire aux lignes de forces.

2° Quand il fait un angle de 30° avec celles-ci.

— SOLUTION —

La force est donnée par la formule de Laplace

$$F = BIl \sin \alpha$$

$$1^\circ \alpha = 90^\circ \quad \sin \alpha = 1$$

$$F = 0,4 \cdot 5 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ N}$$

$$2^\circ \alpha = 30^\circ \quad \sin \alpha = 0,5$$

$$F = 0,4 \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,1 \text{ N}$$

**26. 02.** — L'induction produite par un aimant est mesurée par une balance de Cotton :  $l = 2 \text{ cm}$   $I = 7 \text{ A}$ . Pour équilibrer la force électromagnétique il faut placer 6,3 g dans le plateau. Calculer l'induction ( $\vec{B}$  et  $\vec{I}$  sont perpendiculaires).

— SOLUTION —

Poids des masses ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

$$P = Mg = 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 6,3 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

Induction

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{6,3 \cdot 10^{-2}}{7 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = \frac{6,3}{14} = 0,45 \text{ T}$$



## II. — AVEC RÉPONSES.

**26. 03.** — Résoudre le problème **26. 01** avec les données suivantes :

$$l = 25 \text{ cm} \quad I = 6 \text{ A} \quad B = 0,3 \text{ T}$$

Réponses:  $0,45 \text{ N}, 0,225 \text{ N}$

**26. 04.** — Résoudre le problème **26. 02** avec les données suivantes :

$$l = 2 \text{ cm} \quad I = 5 \text{ A} \quad M = 3,1 \text{ g}$$

Réponses :  $0,31 \text{ T}$

## III. — A RÉDIGER.

**26. 05.** — Un conducteur rectiligne de  $0,4 \text{ m}$  de longueur et parcouru par un courant de  $12 \text{ A}$  est placé dans une induction  $B = 0,25 \text{ T}$ .

Calculer la force électromagnétique qui s'exerce sur le conducteur quand il fait avec les lignes de force les angles suivants :  $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$ ;  $90^\circ$ .

Préciser sur un croquis le sens de la force.

**26. 06.** — Une balance de Cotton possède un conducteur actif de  $3 \text{ cm}$  traversé par un courant de  $8 \text{ A}$ .

1° Quelle masse faut-il placer pour équilibrer la force développée par une induction de  $0,5 \text{ T}$ ?

2° Calculer l'induction dans laquelle se trouve le conducteur quand il faut  $7,2 \text{ g}$  pour rétablir l'équilibre.

**N. B.** — Le conducteur est toujours perpendiculaire à l'induction.

---

## FLUX D'INDUCTION MAGNÉTIQUE

### 185. *Notions de flux.*

**1° Nécessité d'une nouvelle grandeur.** — Il est pratiquement impossible d'obtenir dans une grande étendue un champ magnétique uniforme, c'est-à-dire un champ dont l'induction aurait même valeur en tout point.

Les lois de variations de  $B$  n'étant pas simples, les calculs utilisant cette grandeur deviennent vite compliqués ou impossibles.

Nous allons donc introduire une nouvelle grandeur dont l'emploi est plus commode et la mesure plus facile.

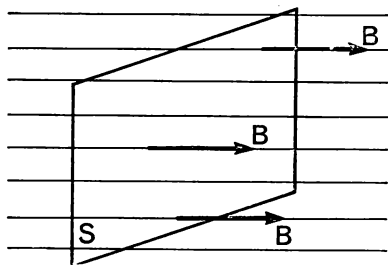


Fig. 201. — Surface perpendiculaire à l'induction.

**2° Définition du flux ( $\Phi$ ).** — Plaçons-nous encore une fois dans l'hypothèse d'un champ uniforme, donc d'un vecteur  $\vec{B}$  qui reste équivalent à lui-même, et soit une surface plane perpendiculaire aux lignes de force.

On appelle *flux* du vecteur constant  $\vec{B}$  à travers cette surface plane le produit de la mesure de  $B$  par l'aire  $S$  de la surface (fig. 201).

$$\Phi = BS \quad \left\{ \begin{array}{l} B \text{ en teslas} \\ S \text{ en m}^2 \\ \Phi \text{ en webers (voir § 186)} \end{array} \right.$$

**3° Formule.** — Une surface oblique doit être remplacée par sa projection sur un plan perpendiculaire aux lignes de force.

Soit  $\alpha$  l'angle de la surface et de sa projection, cet angle est aussi celui de  $\vec{B}$  et de la normale  $\vec{N}$  à la surface (fig. 202 a et b).

Le flux est alors :

$$\Phi = BS' = BS \cos \alpha$$

(30)

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ en teslas} \\ S \text{ en m}^2 \\ \Phi \text{ en webers} \end{array} \right.$$

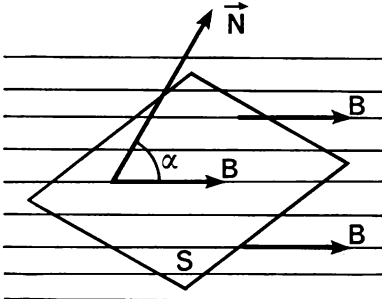


Fig. 202 a. — Surface oblique.

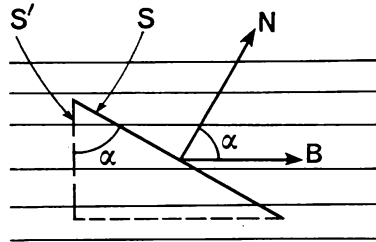


Fig. 202 b. — Vue de face de la fig. 202 a.

REMARQUES. — a) Si  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$  et on retrouve le cas précédent où  $\Phi = BS$ .

b) Si  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$  et  $\Phi = 0$ , le flux est nul, ce qui s'explique facilement par le fait que la surface n'est traversée par aucune ligne de force (fig. 203).

4° **Cas général.** — Si le champ est quelconque, le flux n'est plus calculable. C'est sans importance car on sait le mesurer et, de cette mesure, on peut déduire une valeur moyenne de l'induction à travers la surface :

$$B_{\text{moy}} = \frac{\Phi}{S}$$

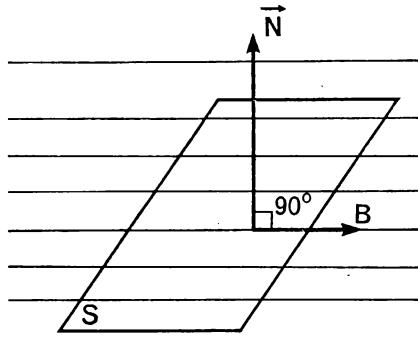


Fig. 203. — Le flux est nul.

### 186. Unité de flux.

1° **Le weber (Wb).** — C'est le flux qui traverse une surface plane de  $1 \text{ m}^2$  placée perpendiculairement aux lignes de force d'un champ uniforme dont l'induction est 1 tesla.

2° **Ordres de grandeur de flux.** — Sous un pôle d'aimant, quelques centaines de microwebers; sous un pôle de machine (générateur ou moteur), quelques centièmes de weber.

Le weber est donc une grande unité.

3° **Ancienne unité.** — Le maxwell (Mx), qui correspond à une induction de 1 G à travers 1 cm<sup>2</sup> :

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

$$1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$$

$$1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2 = 1 \text{ Wb} = 10^4 \text{ G} \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 10^8 \text{ Mx}$$

### 187. Flux algébrique.

1° **Flux à travers une spire placée dans un champ.** — Quand une spire conductrice est placée dans un champ elle est traversée par un flux  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Si la spire n'est parcourue par aucun courant ses deux faces sont identiques et après une rotation de 180° on retrouve le même flux (fig. 204).

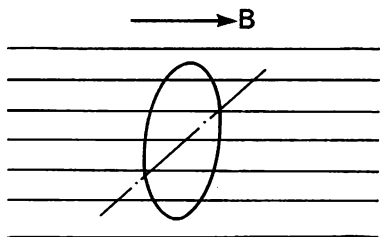


Fig. 204. — Après rotation de 180° le flux est le même.

2° **Flux propre d'une spire.** — Si la spire est parcourue par un courant elle crée un champ magnétique et l'induction de ce champ produit déjà un flux à travers la surface.

Ce flux produit par la spire elle-

même est son « **flux propre** ». Les lignes de force du champ entrent par la face Sud, par extension nous dirons que le *flux propre entre par la face Sud* (fig. 205).

Si maintenant nous plaçons cette spire dans un champ magnétique étranger elle sera traversée par un flux supplémentaire, de deux choses l'une :

- ou ce flux s'ajoutera arithmétiquement au flux propre,
- ou il s'en retranchera.

Pour distinguer les deux cas, nous allons considérer que le flux

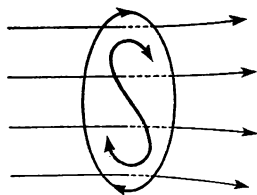


Fig. 205. — Le flux propre entre par la face Sud.

traversant une spire (ou un circuit quelconque) déjà parcourue par un courant est algébrique.

Il est naturel :

- a) *De repérer les flux étrangers par rapport au flux propre ;*
- b) *De considérer ce flux propre comme positif.*

**3° Convention de signe.** — Le flux qui traverse un circuit électrique parcouru par un courant est positif quand il entre par la face Sud de ce circuit. Il est négatif dans le cas contraire <sup>(1)</sup>.

**4° Flux à travers une bobine de N spires** (fig. 206). — Lorsqu'une bobine est placée dans un champ, chaque spire est traversée par un flux  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

Si le champ est uniforme, le flux total à travers la bobine (on dit aussi flux embrassé) est :

$$\Phi_t = \Phi \cdot N = BSN \cos \alpha$$

**EXEMPLE.** — Une bobine de 600 spires est placée dans un champ uniforme dont l'induction est 0,5 T, l'axe de la bobine étant parallèle aux lignes de force et la section d'une spire étant de 12 cm<sup>2</sup> quel est le flux total à travers la bobine ?

Flux à travers une spire :

$$\Phi = BS = 0,5 \cdot 12 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

Flux total :

$$\Phi_t = 600 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 0,36 \text{ Wb.}$$

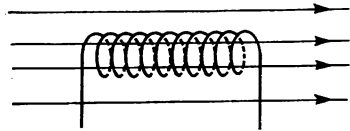


Fig. 206. — Chaque spire est traversée par le flux.

## 188. Mesure des flux.

**1° Le fluxmètre** (fig. 207) permet la mesure des flux ou plus exactement des variations de flux. Il est accompagné d'une bobine exploratrice, plate, dont on connaît le nombre N de spires et la surface S de celles-ci. On place la bobine dans le flux à mesurer et on la retire brusquement hors du champ (fig. 208).

Le fluxmètre mesure la variation de flux correspondante :

$$\Delta \Phi = \text{flux final} - \text{flux initial} = \Phi_2 - \Phi_1$$

(1) Consulter le problème 27. 03 à titre de complément.

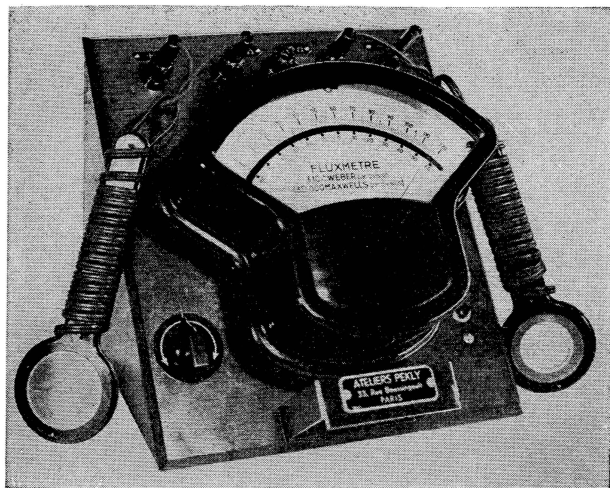


Photo Pekly.

Fig. 207. — Fluxmètre.

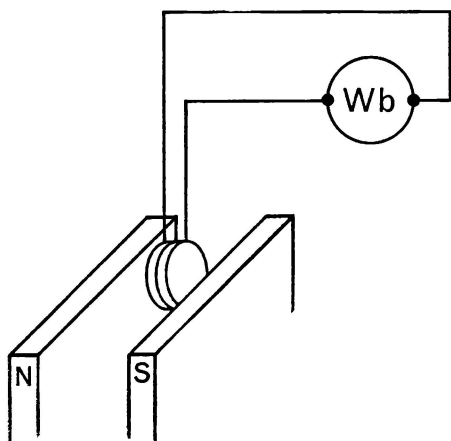


Fig. 208. — En retirant la bobine hors du champ on mesure le flux qui la traversait.

puisque  $\Phi_2 = 0$  on a :

$$\Delta\Phi = -\Phi_1$$

soit  $\Phi_1$  en valeur absolue.

On peut en déduire l'induction moyenne à travers la bobine :

$$B_{\text{moy}} = \frac{\Phi_1}{NS}$$

Si le fluxmètre dévie de une division pour  $10^{-4}$  Wb, et que la bobine d'exploration a une surface totale  $NS = 200\text{cm}^2$ , on peut mesurer des inductions :

$$B = \frac{10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2}} = \frac{10^{-2}}{2}$$

$$= 0,005 \text{ T} = 50 \text{ G}$$

2° Si l'on veut mesurer des flux ou des inductions très faibles on utilise un galvanomètre balistique (chap. 33).

On peut alors obtenir une déviation de une division pour  $10^{-6}$  Wb soit, avec la même bobine, une induction de  $50 \mu\text{T} = 0,5 \text{ G}$ .

### 189. Propriété du flux.

**1<sup>o</sup> Propriété fondamentale.** — A l'intérieur d'un tube de force le flux conserve une valeur constante. On dit qu'il est conservatif.

Il résulte de cette propriété et de la formule  $B = \frac{\Phi}{S}$  que :

— si le tube de force est divergent, l'induction diminue puisque les sections normales de ce tube sont de plus en plus grandes (fig. 209);

— si le tube est convergent, l'induction augmente.

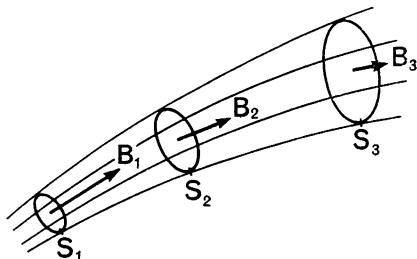


Fig. 209. — A l'intérieur d'un tube de force, l'induction diminue quand la surface augmente.

**2<sup>o</sup> Tube de force dans la matière.** — Dans l'air on a une idée de l'allure des lignes de force grâce aux spectres magnétiques.

Dans la matière (cuivre, fer, bois...) on ne peut former de spectres.

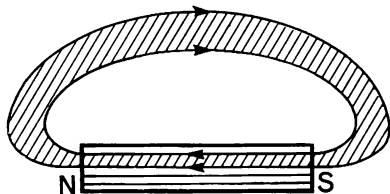


Fig. 210. — A l'intérieur de l'aimant le tube de force continue.

Nous admettons que les lignes et les tubes de force se continuent dans la matière et que la propriété fondamentale y est respectée. On peut ainsi imaginer le tube de force dans un aimant droit, par analogie avec ce que l'on peut voir à l'intérieur d'un solénoïde et compléter ainsi le paragraphe 176, 1<sup>o</sup> c : à l'intérieur d'un aimant droit le

champ est identique à celui d'un solénoïde (fig. 210).

## PROBLÈMES

### I. — AVEC SOLUTION.

**27. 01.** — Calculer le flux qui traverse une surface plane de  $0,2 \text{ m}^2$  placée dans un champ uniforme dont l'induction est  $B = 0,3 \text{ T}$ .

1<sup>o</sup> Quand la surface est perpendiculaire aux lignes de force.

2° Quand la normale à la surface fait un angle de  $30^\circ$  avec ces lignes de force.

— SOLUTION —

Rappelons que  $\Phi = BS \cos \alpha$

1°  $\alpha = 0$   $\cos \alpha = 1$ , le flux est

$$\Phi = BS = 0,2 \cdot 0,3 = 0,06 \text{ Wb}$$

2°  $\alpha = 30^\circ$   $\cos \alpha = 0,866$

$$\Phi = BS \cos \alpha = 0,2 \cdot 0,3 \cdot 0,866 = 0,052 \text{ Wb.}$$

**27. 02.** — Pour mesurer l'induction produite par un aimant au voisinage de son pôle on place la bobine exploratrice d'un fluxmètre contre ce pôle et on la retire brusquement. Le fluxmètre a une déviation de 150 divisions. Calculer l'induction sachant que :

- la bobine sonde comporte 125 spires de 2 cm<sup>2</sup>;
- 1 division du fluxmètre correspond à  $10^{-4}$  Wb.

— SOLUTION —

Le fluxmètre mesure la variation de flux

$$\Delta\Phi = |0 - \Phi| = \Phi$$

Flux à travers la sonde :

$$\Phi = 150 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

Induction mesurée :

$$B = \frac{\Phi}{nS} = \frac{150 \cdot 10^{-4}}{125 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,6 \text{ T}$$

**27. 03.** — Un cadre conducteur de 20 spires ayant une surface de 0,4 m<sup>2</sup> est traversé par un courant de 1,25 A et placé dans un champ uniforme dont l'induction est 0,12 T.

1° Calculer le flux arithmétique traversant ce cadre quand il est perpendiculaire aux lignes de force.

2° Quel est le flux algébrique? (distinguer les 2 cas).

— SOLUTION —

1° Flux arithmétique :

$$\Phi = BSN = 0,12 \cdot 0,4 \cdot 20 = 0,96 \text{ Wb}$$

2° Flux algébrique :

a) l'induction entre par la face Sud :

$$\Phi_1 = + 0,96 \text{ Wb}$$

b) l'induction entre par la face Nord :

$$\Phi_2 = - 0,96 \text{ Wb}$$



**Complément.** — Pour une position quelconque du cadre le flux est positif ou négatif. Traçons la normale au cadre et orientons-la comme les lignes de force du champ propre (fig. 210 bis). Soit  $\alpha$  l'angle  $(\vec{B}, \vec{N})$ , le flux arithmétique est toujours  $BSN \cos \alpha$ .

a) Si  $-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}$   $\cos \alpha > 0$ ,

le flux étranger entre par la face Sud :  $\Phi > 0$ .

b) Si  $+\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{3\pi}{2}$   $\cos \alpha < 0$ ,

le flux étranger entre par la face Nord :  $\Phi < 0$ .

donc la formule  $\Phi = BSN \cos \alpha$  donne  $\Phi$  en grandeur et en signe si  $\alpha = (\vec{B}, \vec{N})$ , la normale  $\vec{N}$  étant orientée dans le même sens que les lignes de force propres.

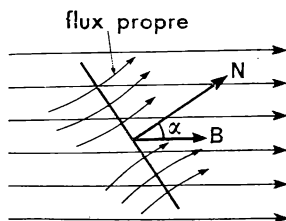


Fig. 210 bis.

**REMARQUE.** — La valeur du courant est inutile, mais le sens du courant sert à orienter le flux.

## II. — AVEC RÉPONSES.

**27. 04.** — La bobine d'un fluxmètre est placée, perpendiculairement aux lignes de force, entre les pôles d'un aimant en fer à cheval. Quand on la retourne (rotation de  $180^\circ$ ) le fluxmètre dévie de 124 divisions. Calculer l'induction entre les pôles de l'aimant.

On donne :

- fluxmètre : 1 division =  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$  ;
- bobine :  $n = 50$   $S = 2 \text{ cm}^2$ .

Réponse :  $B = 0,31 \text{ T}$ .

**27. 05.** — Une bobine de 200 spires ayant chacune une section de  $10 \text{ cm}^2$  est placée dans un champ uniforme dont l'induction est  $0,4 \text{ T}$ . L'axe de la bobine fait un angle de  $45^\circ$  avec les lignes de force. Calculer :

- 1° Le flux à travers la section droite de la bobine.
- 2° Le flux total embrassé.

Réponses :  $0,283 \text{ mWb}$  ;  $0,0566 \text{ Wb}$ .

## III. — A RÉSOUDRE.

**27. 06.** — Pour mesurer le champ terrestre on a fabriqué un cadre de 50 spires de  $0,5 \text{ m}^2$  de surface pouvant tourner autour d'un axe et relié à un fluxmètre (1 division =  $10^{-4} \text{ Wb}$ ). Le cadre est placé perpendiculairement aux lignes de force du champ terrestre, et amené parallèlement à ces mêmes lignes.

Le fluxmètre indique 10 divisions. Calculer :

- 1° Le flux initial à travers le cadre.
- 2° L'induction du champ terrestre (en tesla et en gauss).
- 3° La déviation que donnerait un galvanomètre balistique sensible à 500 maxwells par division.

N. B. — La valeur trouvée correspond au champ terrestre total et non à la composante horizontale.

**27. 07.** — L'axe d'une bobine de 600 spires de  $12 \text{ cm}^2$  de section est placé parallèlement aux lignes de force d'un champ magnétique. La bobine est reliée directement à un fluxmètre. Quand on la retire du champ le fluxmètre indique 12 mWb. Calculer :

- 1° Le flux à travers la section droite de la bobine.
- 2° L'induction moyenne du champ.

**27. 08.** — Une bobine exploratrice comportant 50 spires de  $1,5 \text{ cm}^2$  est placée sous un pôle de machine électrique. Quand on retire la bobine le fluxmètre indique 10,5 mWb. Calculer le flux total qui sort du pôle en supposant que l'induction a une valeur constante. La surface du pôle est  $0,4 \text{ m}^2$ .

---

## INDUCTIONS DUES AUX COURANTS

### 190. Étude expérimentale.

**1° Rappel.** — Nous avons au chapitre 25 étudié l'aspect qualitatif des champs magnétiques produits par les courants. L'induction en un point étant tangente à la ligne de force nous n'avons aucune difficulté à placer le vecteur  $\vec{B}$  correspondant. Il nous reste à préciser les relations qui lient les valeurs de  $B$  et celles du courant  $I$ .

**2° Difficulté de l'expérimentation.** — Les inductions produites par les courants dans le *vide et dans l'air* sont peu intenses ( $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  T), la mesure en est donc difficile avec une balance de Cotton ou un fluxmètre. On peut cependant vérifier correctement la proportionnalité de  $B$  et de  $I$  en utilisant un galvanomètre balistique.

**3° Influence du courant.** — Utilisons une bobine  $B$  de 600 spires réparties sur une longueur de 10 cm et supportant un courant de 1 A. Plaçons la bobine exploratrice  $b$  contre  $B$  et lisons l'indication du galvanomètre à la suppression du courant (fig. 211) :

| $I$ (A)         | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1   |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d$ (divisions) | 25  | 49  | 74  | 100 | 125 |

la déviation est proportionnelle à  $I$  donc : l'induction est proportionnelle au courant.

REMARQUE. — On obtiendrait le même résultat avec un circuit de forme quelconque.

**4° Influence de la forme du circuit.** — *a)* Pour le même courant de 1 A on obtient une déviation à peine lisible avec un courant rectiligne et  $b$  placée contre le fil (fig. 212).

*b)* Avec une bobine plate de 50 spires et toujours  $I = 1$  A, on obtient

une déviation de quelques divisions si  $b$  est au centre de la bobine (fig. 213).

*L'induction en un point dépend de la position du point et de la forme du circuit.*

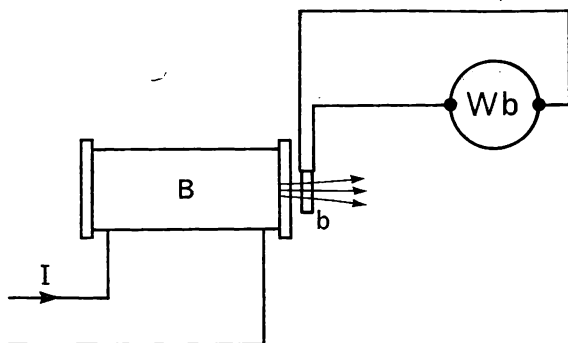


Fig. 211. — L'induction est facilement mesurable.

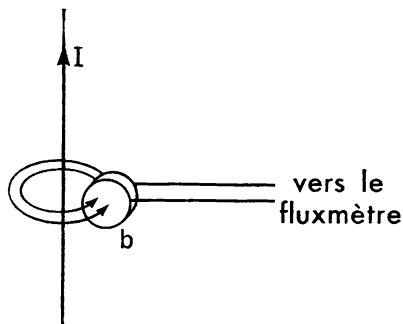


Fig. 212. — L'induction est à peine décelable.

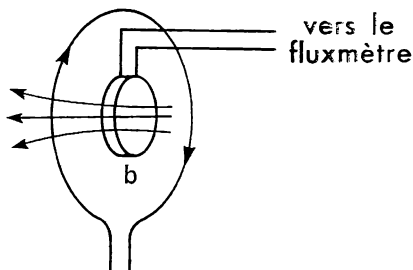


Fig. 213. — L'induction est faible.

**5° Formules donnant l'induction.** — Les formules qui suivent donnent l'induction qui serait produite dans le vide ou dans l'air, elles sont établies mathématiquement à partir d'une loi énoncée par *Biot et Laplace*. Leur établissement dépasse le cadre de ce cours.

### 191. Courant rectiligne (fig. 214).

1° Soit  $a$  la distance du point au fil :

$$B_0 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{a}$$

$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ en ampères} \\ a \text{ en mètres} \\ B \text{ en teslas} \end{array} \right.$

2° **Remarques.** — a) La formule est exacte pour un fil *infinitement long*.

b) Elle s'applique en pratique à un fil fini pourvu que la longueur  $l$  du fil soit grande devant  $a$ , par exemple  $l \geq 10 a$ ; en outre le point considéré doit être éloigné des extrémités du fil.

3° **Exemple :**

$$I = 20 \text{ A} \quad a = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

$$B_0 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{20}{0,02} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

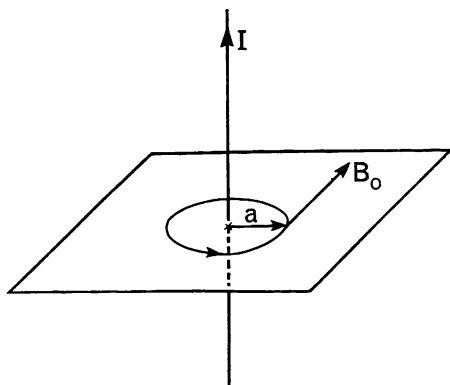


Fig. 214. — Induction à une distance  $a$  du fil.

Cette induction est à peu près sans influence sur une balance de Cotton.

**192. Courant circulaire** (fig. 215).

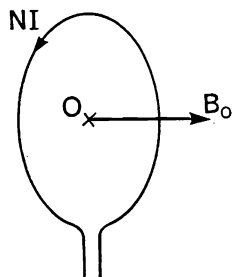


Fig. 215. — Induction au centre de la spire.

1° Seule la valeur de l'**induction au centre** de la spire unique, ou de la bobine plate, s'exprime simplement.

Soit  $R$  le rayon des spires, l'induction au centre  $O$  est :

$$B_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{R}$$

|   |                      |
|---|----------------------|
| } | $N$ nombre de spires |
|   | $I$ en ampères       |
|   | $R$ en mètres        |
|   | $B$ en teslas        |

2° **Exemple.** — Pour  $NI = 20$      $R = 2 \text{ cm}$  :

$$B_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \frac{20}{0,02} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

Notons que le produit  $NI$  est appelé nombre d'**ampères-tours**.

**193. Bobine longue ou solénoïde** (fig. 216).

1° Soit  $N$  le nombre total de spires,  $l$  la longueur de la bobine et  $I$  le courant, l'induction est au voisinage du centre  $O$  :

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{NI}{l}$$

|   |                |
|---|----------------|
| } | $I$ en ampères |
|   | $l$ en mètres  |
|   | $B$ en teslas  |



Fig. 216. — Induction à l'intérieur du solénoïde.

**2° Exemple :**

$$N = 800 \quad l = 0,5 \text{ m} \quad I = 2 \text{ A}$$

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{800 \cdot 2}{0,5} = 4 \text{ mT}$$

3° Le produit  $NI$  est le nombre d'ampères-tours, le quotient  $\frac{N}{l} = n_1$  est le *nombre de spires par mètre*.

4° La formule peut donc s'écrire :

$$(31) \quad \boxed{B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} n_1 I} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_1 \text{ spires par mètre} \\ I \text{ en ampères} \\ B \text{ en teslas} \end{array} \right.$$

5° **Remarques importantes.** — a) En toute rigueur la formule ne s'applique qu'à une bobine *infiniment longue*. La formule est alors exacte en tout point intérieur.

b) *Pour une bobine réelle, la valeur trouvée est correcte au voisinage du centre si la longueur  $l$  est grande par rapport au diamètre  $d$  des spires.*

c) La vraie valeur de l'induction au centre  $O$  de la bobine est inférieure à celle que donne la formule :

— de 5 % si  $l = 3 d$

— de 3 % si  $l = 4 d$

— de 2 % si  $l = 5 d$

— de 1 % si  $l = 7 d$

d) *Même si  $l \geq 7d$  la formule ne s'applique pas au voisinage des extrémités.*

e) *Sur les faces d'une bobine l'induction est à peu près égale à la moitié de sa valeur au centre.*

6° **Conclusion.** — La formule donne une valeur toujours trop grande, or  $4\pi \simeq 12,56$ , en arrondissant à 12,5 on se rapproche de la vérité et on allège les calculs, on peut donc écrire :

$$B_0 = 12,5 \cdot 10^{-7} n_1 I = \frac{12,5}{10\,000\,000} n_1 I$$

$$\boxed{B_0 = \frac{n_1 I}{800\,000}}$$

### 194. Théorème d'Ampère (simplifié).

1° **Énoncé.** — Si le long d'une ligne de force fermée, l'induction a une valeur constante, le produit de celle-ci par la longueur de la ligne

est égal au produit de  $4\pi \cdot 10^{-7}$  par le nombre d'ampères-tours entourés par la ligne.

**2° Vérification.** (fig. 217). — Soit un fil rectiligne parcouru par un courant  $I$ . Les lignes de force sont des lignes fermées (cercles). Plaçons-nous sur celle de rayon  $a$ , l'induction y a une valeur constante :

$$B_0 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{a}$$

la longueur de la ligne (circonférence) est  $l = 2\pi a$ . Effectuons le produit

$$B_0 l = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{a} \cdot 2\pi a = 4\pi \cdot 10^{-7} I.$$

Or la ligne entoure le courant  $I$  du fil, le théorème est vérifié.

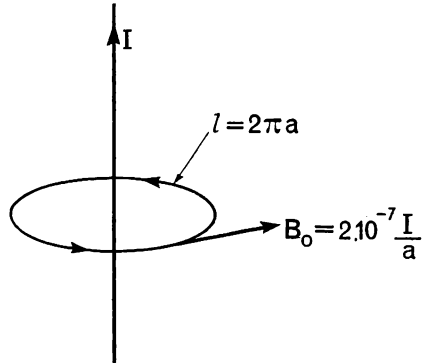


Fig. 217. — Vérification du théorème d'Ampère.

**3° Application.** — Considérons une bobine en forme de tore de  $N$  spires parcourues par un courant  $I$  et cherchons l'induction à l'intérieur. Les lignes de force sont des circonférences de longueur  $l$  et, par raison de symétrie, l'induction a même valeur en tout point de l'une d'elles. Ces lignes de forces entourent les  $NI$  ampères-tours de la bobine. Appliquons le théorème d'Ampère :

$$B_0 l = 4\pi \cdot 10^{-7} NI$$

d'où :

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{l} \\ = 4\pi \cdot 10^{-7} n_1 I$$

nous retrouvons la formule du solénoïde infiniment long. Remarquons que la longueur de la circonférence dépend de la ligne de force choisie (fig. 218). On ne commet pas

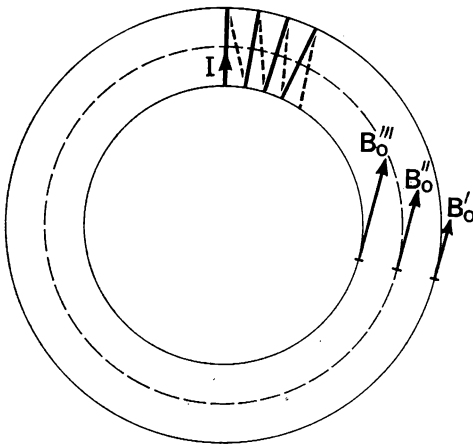


Fig. 218. — L'induction décroît de l'intérieur vers l'extérieur.

une grosse erreur en ne retenant qu'une seule valeur pour  $l$ , celle de la circonférence moyenne, à la condition que le rayon  $R$  de la bobine soit grand devant le rayon  $r$  d'une spire (problème 28. 02).

### 195. Champ magnétique.

1° Remarquons que toutes les formules donnant  $B$  dans le vide (ou l'air) contiennent le facteur  $10^{-7}$ , parfois  $4\pi$  et que  $B$  est toujours donnée par le quotient d'un courant par une longueur. **Pour simplifier la formule 31 qui est de loin la plus usuelle, posons :**

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

$\mu_0$  est la **constante magnétique** ou **perméabilité du vide**. La formule 31 devient :

$$B_0 = \mu_0 n_1 I$$

Posons :

$$\frac{B_0}{\mu_0} = H \quad \text{soit} \quad H = n_1 I$$

**$H$  est appelé champ magnétique** (ou excitation magnétique).

2° **Unité de champ magnétique :**

$$n_1 I = \frac{NI}{l}$$

est le quotient d'un courant par une longueur, le champ magnétique s'exprime en **ampères par mètre (A/m)**. On dit aussi ampères-tours par mètre.

3° **Les formules du chapitre peuvent s'écrire :**

a) *Courant rectiligne :*

$$B_0 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{a} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad \text{avec} \quad H = \frac{I}{2\pi a}$$

b) *Courant circulaire :*

$$B_0 = 2\pi \cdot 10^{-7} \frac{NI}{R} = \mu_0 \frac{NI}{2R} \quad \text{avec} \quad H = \frac{NI}{2R}$$

c) *Solénoïde ou tore :*

$$B_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} n_1 I = \mu_0 n_1 I \quad \text{avec} \quad H = n_1 I$$



On remarque que les formules exprimant  $H$  sont plus simples, donc plus faciles à retenir que celles donnant  $B_0$ . Le passage de  $H$  à  $B_0$  est commode et unique :

$$B_0 = \mu_0 H$$

Retenons en particulier la formule du solénoïde (ou du tore) qui est la plus usuelle :

$$(32) \quad \boxed{H = n_1 I} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_1 \text{ spires par mètres} \\ I \text{ en ampères} \\ H \text{ en A/m} \end{array} \right.$$

4° Le champ magnétique est, comme l'induction, une grandeur vectorielle. L'induction dans le vide étant égale au produit de  $\vec{H}$  par le scalaire positif  $\mu_0$  les deux vecteurs  $\vec{H}$  et  $\vec{B}_0$  ont même support et même sens :

$$\boxed{\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}}$$

### 196. Action mutuelle de deux courants dans le vide.

1° **Courants parallèles et de même sens** (fig. 219). — Soient deux conducteurs infiniment longs parcourus par des courants de même sens  $I$  et  $I'$ . Appelons  $A$  et  $A'$  les points où ces fils traversent un plan  $P$  qui leur est perpendiculaire.

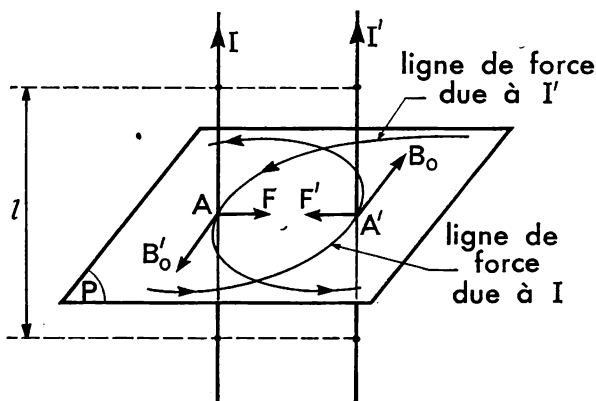


Fig. 219. — Deux courants parallèles et de même sens s'attirent.

a) Le courant  $I$  produit en  $A'$  :

$$\text{— un champ } H = \frac{I}{2\pi a}$$

$$\text{— et une induction } B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

les deux fils étant parallèles  $a$  est constant tout le long du fil  $I'$ .

Soit une portion de longueur  $l$  du fil  $I'$ , la force qui s'exerce sur cette portion  $l$  est :

$$F' = B_0 I' l = \mu_0 \frac{I}{2\pi a} \cdot I' l$$

b) Le courant  $I'$  produit en A :

— un champ  $H' = \frac{I'}{2\pi a}$

— et une induction  $B'_0 = \frac{\mu_0 I'}{2\pi a}$  la force qui s'exerce sur une portion  $l$  du fil  $I$  est :

$$F = B'_0 I l = \frac{\mu_0 I'}{2\pi a} I l$$

et l'on trouve  $F = F'$ , il ne saurait en être autrement (Cours de mécanique : égalité des actions réciproques de deux corps).

On constate d'autre part que les forces sont de sens contraires et attractives. Leur module commun s'écrit :

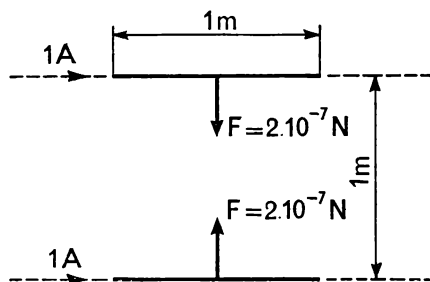


Fig. 220. — Définition de l'ampère.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot II' \cdot \frac{l}{a} = 2 \cdot 10^{-7} II' \frac{l}{a}$$

Si l'on fait :

$I = I' = 1 \text{ A}$      $l = 1 \text{ m}$     et     $a = 1 \text{ m}$     on a     $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

C'est cette formule qui a servi à définir l'ampère (fig. 220).

**2° Définition légale de l'ampère.** — L'ampère est l'intensité d'un courant continu constant qui, maintenu dans deux conducteurs rectilignes, parallèles, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force égale à  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$  par mètre de longueur.

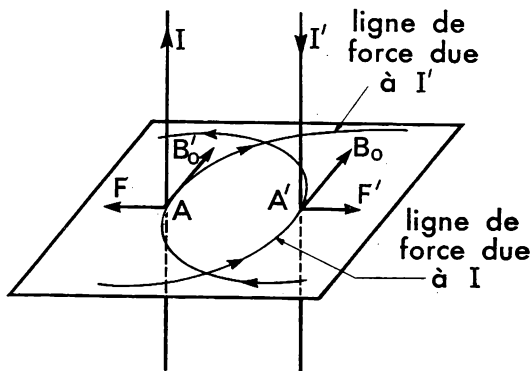


Fig. 221. — Deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent.

3° **Courants parallèles et de sens contraires** (fig. 221). — On vérifiera sans peine que les forces ont même module et sont répulsives.

## PROBLÈMES

### I. — AVEC SOLUTION.

**28. 01.** — Un solénoïde de 40 cm de longueur comporte 800 spires traversées par un courant de 1,5 A. En admettant que la formule de la bobine infiniment longue s'applique ici en tout point intérieur, calculer :

1° Le champ et l'induction dans le vide à l'intérieur du solénoïde.

2° La section droite de la bobine étant 12 cm<sup>2</sup>, calculer le flux propre à travers une spire et le flux total embrassé.

— SOLUTION —

1° Champ magnétique :

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{800 \cdot 1,5}{0,4} = 3\,000 \text{ A/m.}$$

Induction :

$$B_0 = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3\,000 = 12\pi \cdot 10^{-4} \\ = 3,77 \text{ mT.}$$

2° Flux à travers une spire :

$$\Phi = B_0 S = 3,77 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-4} = 4,52 \cdot 10^{-6} \text{ Wb.}$$

Flux embrassé :

$$\Phi_t = N\Phi = 800 \cdot 4,52 \cdot 10^{-6} = 3,62 \text{ mWb.}$$

**28. 02.** — Une bobine en forme de tore a les dimensions suivantes (voir fig. 218) :

Diamètre intérieur  $D_i = 260 \text{ mm.}$

Diamètre extérieur  $D_e = 340 \text{ mm.}$

Nombre de spires :  $N = 1\,200.$

Courant :  $I = 2,5 \text{ A.}$

Calculer :

1° Le diamètre moyen de la bobine, le rayon d'une spire et sa section.

2° Le champ sur chacune des trois circonférences : intérieure, extérieure et moyenne.

3° L'induction sur la circonférence moyenne. On admettra pour le 4° que cette valeur est celle qui existe en tout point intérieur de la bobine.

4° Le flux propre à travers une spire et le flux total (embrassé).

## — SOLUTION —

1<sup>o</sup> Diamètre moyen :

$$D_m = \frac{260 + 340}{2} = 300 \text{ mm}$$

Rayon d'une spire :

$$R = \frac{340 - 260}{4} = 20 \text{ mm}$$

Section :

$$S = \pi R^2 = 400 \pi = 1\,250 \text{ mm}^2 = 12,5 \text{ cm}^2.$$

2<sup>o</sup> Champ magnétique  $H = \frac{NI}{l} = \frac{3\,000}{l}$  (théorème d'Ampère).

Calculons les longueurs des circonférences :

$$l_e = 340 \pi = 1\,070 \text{ mm} \quad l_m = 300 \pi = 942 \text{ mm} \\ l_i = 260 \pi = 815 \text{ mm}$$

à l'extérieur :

$$H' = \frac{3\,000}{1,07} = 2\,800 \text{ A/m}$$

au milieu :

$$H'' = \frac{3\,000}{0,942} = 3\,180 \text{ A/m}$$

à l'intérieur

$$H''' = \frac{3\,000}{0,815} = 3\,680 \text{ A/m}$$

3<sup>o</sup> Induction

$$B_o = \mu_o H'' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3\,180 = 4 \text{ mT.}$$

4<sup>o</sup> Flux à travers une spire :

$$\Phi = B_o S = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 12,5 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Wb.}$$

Flux total :

$$\Phi_t = N\Phi = 1\,200 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 6 \text{ mWb.}$$

**28. 03.** — Deux conducteurs très longs, rectilignes et parallèles, parcourus par un courant de 100 A sont distants de 10 cm. Calculer la force qui s'exerce sur 1 km de chaque conducteur.

## — SOLUTION —

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I I' \frac{l}{a} \\ = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 100 \frac{1\,000}{0,1} = 20 \text{ N.}$$

II. — AVEC RÉPONSES.

**28. 04.** — Calculer le champ produit par une bobine circulaire plate en son centre :  $N = 50$  spires ;  $I = 4$  A ;  $R = 8$  cm.  
Quelle est l'induction correspondante?

Réponses : 1 250 A/m ; 1,57 mT

**28. 05.** — Une bobine longue comporte 600 spires parcourues par un courant de 3,5 A. La longueur de la bobine est 0,5 m, sa section  $20 \text{ cm}^2$ . Calculer:  
 1° Le champ magnétique (supposé uniforme à l'intérieur); 2° l'induction;  
 3° le flux total.

Réponses :

4 200 A/m;    5,3 mT;    6,36 mWb

### III. — A RÉSOUDRE.

**28. 06.** — Lors d'un court-circuit deux conducteurs rectilignes parallèles et très longs sont parcourus par un courant de 10 000 A. Calculer la force qui s'exerce par 10 m de conducteur s'ils sont distants de 10 cm.

**28. 07.** — Un solénoïde de 40 cm de longueur comporte 750 spires traversées par un courant de 2 A. La section d'une spire est  $10 \text{ cm}^2$ .

1° Calculer le champ et l'induction à l'intérieur.

2° Quel est le flux à travers la section droite et quel est le flux total?

3° Comment varient  $H$ ,  $B_0$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi_t$  quand on double le nombre de spires du solénoïde :

a) en doublant la longueur;

b) en mettant sur la même longueur une seconde couche de spires. (La section est pratiquement inchangée.)

N. B. — On appliquera la formule du solénoïde infiniment long.

**28. 08.** — Une bobine en forme de tore a un diamètre moyen de 240 mm et une section de  $8 \text{ cm}^2$ . Elle comporte 1 250 spires traversées par un courant de 6 A. Calculer :

1° Le champ et l'induction sur la circonférence moyenne.

2° Le flux total à travers la bobine en admettant que les valeurs du 1° sont valables en tout point.

## TRAVAIL DES FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

### 197. Expérience.

1° **Description du système.** — Sur deux rails parallèles, fixes et rigides, plaçons un rail mobile (fil rigide en cuivre ou en aluminium). Alimentons les deux rails fixes par une batterie d'accumulateurs pouvant

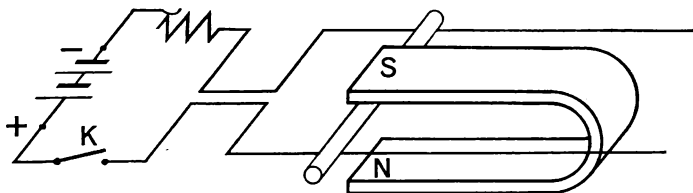


Fig. 222. — Rails de Laplace.

fournir une vingtaine d'ampères et plaçons un aimant en fer à cheval comme l'indique la figure 222.

2° **Expérimentation.** — Quand nous fermons l'interrupteur K, le rail mobile se déplace sous l'action de la force de Laplace, on retrouve facilement le sens du déplacement par la règle des trois doigts (fig. 223).

La force électromagnétique a produit un travail que nous pouvons calculer.

3° **Calcul du travail.** — Nous supposons, dans les calculs, que le champ est uniforme donc que  $B = C^{te}$ .

Soit  $l$  la portion de conducteur mobile comprise entre les rails. La force électromagnétique est :

$$F = BI l \quad (\alpha = 90^\circ, \sin \alpha = 1)$$

Le déplacement est :

$$AA' = d$$

Le travail effectué est :

$$W = F.d = BIl d$$

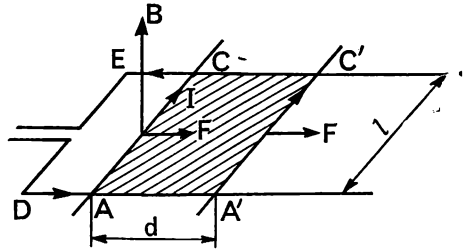


Fig. 223. — Le conducteur se déplace vers la droite.

### 198. Lois.

**1° Flux coupé et variation de flux.** — En se déplaçant le rail mobile a coupé la surface rectangulaire AA'C'C (fig. 223) dont l'aire est :

$$S = ld$$

Cette surface est traversée par le flux :

$$\Delta\Phi = BS$$

On peut écrire :

$$W = BIl d = BIS = I\Delta\Phi$$

Ce flux  $\Delta\Phi$  à travers S est à la fois :

- le flux coupé par le rail mobile lors de son déplacement;
- la variation de flux à travers le circuit électrique « rails fixes-rail mobile » lors de sa déformation.

**2° La relation est algébrique.** — La face Sud du circuit est au-dessous (fig. 224), le flux étranger dû à B est donc positif.

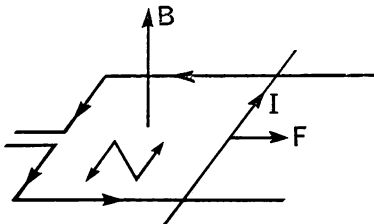


Fig. 224. — L'induction entre par la face Sud.

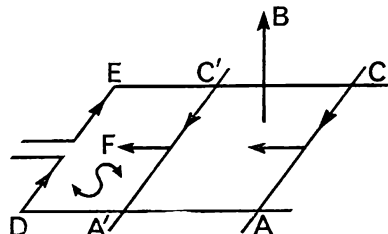


Fig. 225. — Le conducteur se déplace vers la gauche.

Lors du déplacement la surface augmente et  $\Delta\Phi$  est positif. Le travail est positif aussi puisque le rail se déplace dans le sens de F.

Changeons le sens du courant (fig. 225). Le sens du déplacement

est changé, la surface diminue mais, parce que l'induction entre maintenant par la face Nord, le flux est négatif et sa diminution en valeur absolue est une augmentation algébrique, la variation de flux est encore positive et le travail l'est aussi puisque le déplacement se fait toujours dans le sens de  $F$ . Donc :

— Le travail et la variation de flux ont le même signe.

— Si le déplacement est spontané le travail est positif.

Pour obtenir un travail et une variation de flux négatifs il faut à l'aide d'une force extérieure obliger le conducteur à se déplacer dans le sens opposé à celui de la force.

**4° Généralisation.** — La formule établie dans un cas simple est toujours valable :

a) Quelle que soit la forme du circuit.

b) Quelle que soit la distribution des lignes de force et les variations de l'induction d'un point à un autre.

**5° Loi du travail.** — Le travail effectué par un circuit électrique sous l'action de forces électromagnétiques est égal au produit du courant qui traverse ce circuit <sup>(1)</sup>, soit par la variation du flux à travers le circuit; soit par le flux coupé par le circuit.

(33)

$$W = I \Delta \Phi$$

$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ en ampères} \\ \Delta \Phi \text{ en webers} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$

REMARQUE. — Les unités découlent du calcul de  $W$  :

$$\begin{array}{llll} W = Fd & F \text{ en N} & d \text{ en m} & \text{donc } W \text{ en J} \\ \Delta \Phi = BS & B \text{ en T} & S \text{ en m}^2 & \text{donc } \Delta \Phi \text{ en Wb} \end{array}$$

### 199. Règle du flux maximal.

**1° Rappels de faits expérimentaux.** — a) Face à un pôle Nord un aimant mobile s'oriente de façon à présenter son pôle Sud. Il en est de même pour une bobine mobile parcourue par un courant.

b) Le rail mobile du paragraphe 197 se déplace toujours de façon que le flux algébrique qui traverse le circuit augmente.

Qu'il s'agisse de courants électriques effectifs ou de courants parti-

(1) On retient des deux calculs de  $\Delta \Phi$  celui qui est le plus immédiat.



culaires (aimants), le déplacement spontané tend toujours à produire un travail positif donc une variation de flux positive, le flux tend toujours à augmenter.

**2° Énoncé de la règle.** — Lorsqu'un circuit électrique parcouru par un courant est mobile ou déformable et placé dans un champ magnétique, son déplacement ou sa déformation tend toujours à augmenter le flux algébrique qui le traverse.

**3° Conséquences.** — a) Le circuit est déformable et l'induction entre par la face Sud : la surface augmente (fig. 224).

b) Le circuit est déformable et l'induction entre par la face Nord (flux négatif) : la surface diminue (fig. 225).

c) Une bobine pouvant se retourner est placée face Nord contre le pôle Nord d'un aimant : elle se retourne (fig. 226).

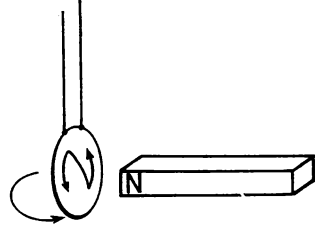


Fig. 226. — La bobine est repoussée puis elle se retourne.

**4° Position d'équilibre stable.** — Si le flux étranger entre par la face Sud d'un circuit, et a une valeur maximale dans les conditions de l'expérience, le circuit a une position d'équilibre stable puisque  $\Phi$  ne peut plus augmenter. On le vérifie avec un cadre mobile autour d'un axe en recherchant le sens des forces électromagnétiques (voir § suivant).

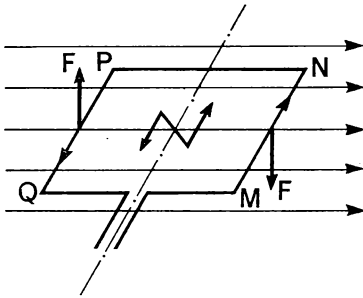


Fig. 227. — Les forces électromagnétiques forment un couple.

à  $\vec{B}$ , dans la position de la figure 227 seuls les côtés MN et PQ, de longueur  $l$ , sont soumis à une force.

Dans la position de la figure 228 les quatre côtés sont soumis à une force mais l'on voit que pour les côtés NP et QM les forces dirigées suivant l'axe de rotation sont sans effet dynamique.

Calculons les forces qui s'exercent sur MN et PQ : leur module

## 200. Couple électromagnétique.

**1° Existence.** — Plaçons un cadre mobile, parcouru par un courant, dans une induction supposée uniforme : l'axe de rotation étant perpendiculaire

commun est  $F = BI\ell$  et ce, quelle que soit la position du cadre puisque pour ces deux côtés  $\vec{B}$  et  $\vec{\ell}$  sont toujours perpendiculaires.

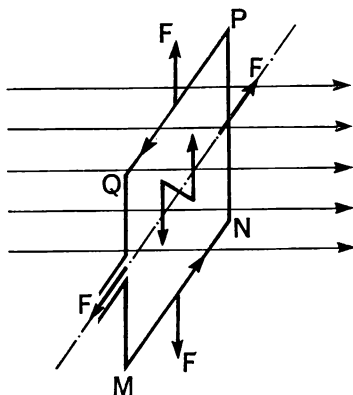


Fig. 228. — Cadre en position d'équilibre stable.

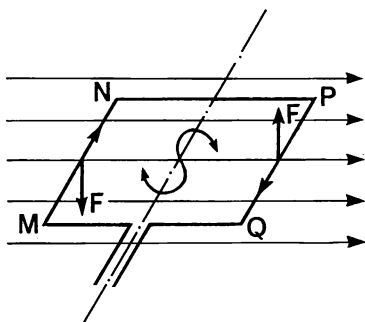


Fig. 229. — Le couple a changé de sens.

Par contre le couple développé par ces deux forces varie avec la position : maximal dans la figure 227, il est nul dans la figure 228. Dans la figure 229 il est à nouveau maximal mais a changé de sens. On voit donc que le cadre peut tourner spontanément mais seulement d'un demi-tour! Nous avons pourtant là le principe du moteur électrique pour lequel il faudra trouver un système conservant au couple un sens constant. Remarquons que l'équilibre est stable quand le flux est maximal (fig. 228) et qu'il y a équilibre instable quand le flux entre par la face Nord (fig. 230).

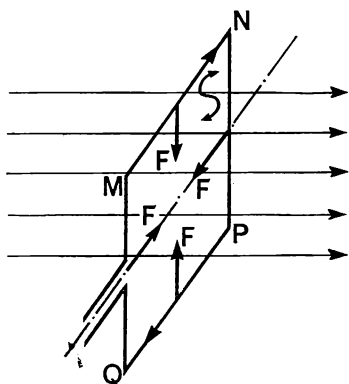


Fig. 230. — Position d'équilibre instable; le cadre peut effectuer spontanément un demi-tour jusqu'à la position de la figure 228.

2° **Calcul.** — La force est  $F = BI\ell$ , soit  $d = NP = QM$ .

a) Le couple maximal est :

$$C_m = BI\ell d$$

Soit  $S = \ell \cdot d$ , la surface de la spire et  $\Phi_m = BS$ , le flux à travers celle-ci quand elle est perpendiculaire à  $\vec{B}$  :

$$C_m = BIS = I\Phi_m$$

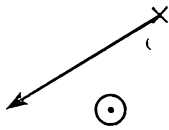
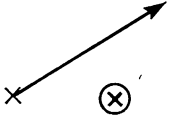


Fig. 231. — Quand un vecteur est perpendiculaire à une figure on le représente par un point, s'il est dirigé vers nous et, par une croix, dans le cas contraire.



b) Dans une position quelconque (fig. 231 et 232) <sup>(1)</sup> définie par l'angle  $\theta$  que fait  $\vec{B}$  avec la normale  $N$  non orientée du cadre :

$$C = BIl \cdot d \sin \theta$$

$$C = I\Phi_m \sin \theta$$

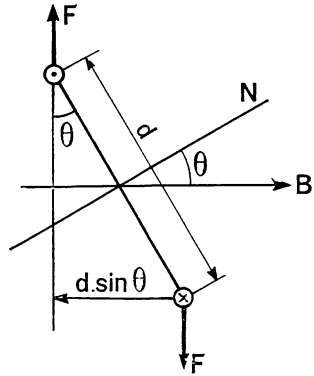


Fig. 232. — Le couple est proportionnel à  $\sin \theta$ .

c) Si le cadre comporte  $N$  spires le couple est multiplié par  $N$  :

$$C = NI\Phi_m \sin \theta = NISB \sin \theta$$

Le produit  $NIS$  ne dépend que de grandeurs relatives au cadre, on l'appelle moment magnétique du cadre :

(34)

$$\boxed{M = NIS}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ en ampères} \\ S \text{ en m}^2 \\ M \text{ en A.m}^2 \end{array} \right.$$

Si le circuit a une forme quelconque, mais plane, de surface  $S$ , le moment magnétique est toujours  $M = NIS$  et le couple est toujours :

(35)

$$\boxed{C = MB \sin \theta}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M \text{ en A.m}^2 \\ B \text{ en teslas} \\ C \text{ en mN} \end{array} \right.$$

REMARQUE. — Si l'on oriente la normale  $N$  dans le sens des lignes de force du champ propre au cadre, le moment magnétique est un vecteur orienté dans le même sens que  $\vec{N}$ ,  $\theta$  est alors l'angle des deux vecteurs  $\vec{M}$  et  $\vec{B}$  et la formule 35 est algébrique.

## 201. Moment magnétique d'un aimant.

Lorsqu'un aimant est placé dans un champ magnétique il tend à s'orienter sous l'action d'un couple.

(1) On notera, figure 231, la convention adoptée pour représenter un vecteur perpendiculaire au plan de la figure.

Par analogie avec un circuit électrique on peut donc lui attribuer un moment magnétique  $\vec{M}$ . Ce dernier est une grandeur vectorielle dirigée suivant l'axe de l'aimant et « sortant » par le pôle Nord (fig. 233).

Le couple qui s'exerce est :

$$C = MB \sin \theta$$

le connaissant, ainsi que  $B$  et  $\theta$  on peut calculer le moment magnétique de l'aimant (Problèmes 29. 03).

En particulier si  $\theta = 90^\circ$   $\sin \theta = 1$  et :

$$M = \frac{C}{B}$$

On remarque que (règle du flux maximal), la position d'équilibre correspond à  $\theta = 0$  donc à  $\vec{M}$  et  $\vec{B}$  de même sens.

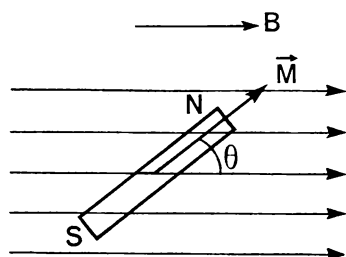


Fig. 233. — Le couple qui s'exerce sur l'aimant tend à rendre  $B$  et  $M$  colinéaires.

## PROBLÈMES

AVERTISSEMENT. — Les énoncés sont allégés au maximum et, pour éviter des redites, se réfèrent aux figures du chapitre en ce qui concerne les positions des systèmes et les notations.

### I. — AVEC SOLUTION.

29. 01. — (Voir fig. 223.) La longueur active du fil est 40 cm, le courant 20 A et l'induction constante 0,5 T.

- 1° Calculer la force électromagnétique;
- 2° Quel est le travail effectué pour un déplacement  $d = 1,6$  m?
- 3° Calculer le flux coupé dans le déplacement;
- 4° Retrouver le travail à l'aide du flux coupé.

— SOLUTION —

- 1° Force :  $F = BI l = 0,5 \cdot 20 \cdot 0,4 = 4$  N.
- 2° Travail :  $W = F \cdot d = 4 \cdot 1,6 = 6,4$  J.
- 3° Flux coupé :  $\Delta \Phi = BS = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 1,6 = 0,32$  Wb.
- 4° Travail :  $W = I \Delta \Phi = 20 \cdot 0,32 = 6,4$  J.

**29. 02.** — (Voir fig. 227 à 230.) Le cadre MNPQ est un carré de 30 cm de côté et comporte 15 spires traversées par un courant de 4 A. L'induction constante est 0,6 T.

1° Calculer les forces qui s'exercent sur les côtés horizontaux MN et PQ du cadre.

2° Quel est le couple développé dans la position 227?

3° Quel est le travail effectué quand le cadre passe de cette position 227 à la position 228?

— SOLUTION —

1° Force :  $F = B I N = 0,6 \cdot 4 \cdot 0,3 \cdot 15 = 10,8 \text{ N}$

(ces forces sont les mêmes pour toutes les positions).

2° Couple. Les forces sont parallèles :

$$C = d \cdot F = 0,3 \cdot 10,8 = 3,24 \text{ mN}$$

3° Le couple varie d'une position à l'autre, aussi pour calculer le travail nous chercherons le flux coupé :

position 228  $\Phi_2 = B S N = 0,6 \cdot 0,3^2 \cdot 15 = 0,81 \text{ Wb}$

position 227  $\Phi_1 = 0$

$$\Delta\Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| = 0,81 \text{ Wb}$$

Travail :  $W = I \Delta\Phi = 4 \cdot 0,81 = 3,24 \text{ J}$

**29. 03.** — Un aimant est placé comme l'indique la figure 233 dans une induction  $B = 0,4 \text{ T}$ . Le couple développé est de 0,22 mN quand  $\theta = 90^\circ$ . Calculer :

1° Le moment magnétique de l'aimant.

2° Le couple qui existerait pour  $\theta = 30^\circ$ .

3° Le courant  $I$  qui devrait traverser une spire de 4 cm de rayon pour produire un moment magnétique égal à celui de l'aimant.

— SOLUTION —

1° Moment magnétique :

$$M = \frac{C}{B} = \frac{0,22}{0,4} = 0,55 \text{ Am}^2$$

2° Couple :  $C = MB \sin \theta = 0,55 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,11 \text{ mN}$

3° Courant :  $M = N I S = I S$

avec  $M = 0,55 \quad S = \pi R^2 \simeq 50 \text{ cm}^2$

$$I = \frac{M}{S} = \frac{0,55}{50 \cdot 10^{-4}} = 110 \text{ A}$$

## II. — AVEC RÉPONSES.

**29. 04.** — (Voir fig. 227 à 230.) Le cadre MNPQ est un carré de 40 cm de côté, il comporte 50 spires et le courant est  $I = 3 \text{ A}$ .

1° Calculer le moment magnétique du cadre.

2° Quel est le couple maximal développé et pour quelle position? ( $B = 0,25 \text{ T}$ .)

Réponses :  $24 \text{ Am}^2$ ;  $6 \text{ mN}$

29. 05. — Le cadre précédent est placé dans la position d'équilibre instable (fig. 230) et libéré. Calculer le travail effectué par le cadre quand il passe de cette position à celle d'équilibre stable (fig. 228). Quel travail faut-il fournir pour le ramener ensuite à la position de la figure 232 avec  $\theta = 30^\circ$ ?

Réponses :  $12 \text{ J}$ ;  $0,8 \text{ J}$  environ

### III. — A RÉSOUDRE.

29. 06. — Résoudre le problème 29. 01 avec les données suivantes :

$$l = 0,65 \text{ m} \quad I = 34 \text{ A} \quad B = 0,45 \text{ T} \quad d = 2,5 \text{ m}$$

29. 07. — Une bobine circulaire plate de 5 cm de rayon comporte 60 spires traversées par un courant de 4,5 A. Calculer :

1° Le moment magnétique de la bobine.

2° Le couple auquel elle est soumise quand on la place dans une induction  $B = 0,32 \text{ T}$  et que

- a) son axe est perpendiculaire à  $B$ ;
- b) son axe fait avec  $B$  un angle de  $60^\circ$ .

29. 08. — Une bobine longue possède 2 400 spires par mètre de longueur. Le courant qui la parcourt est  $I = 1,5 \text{ A}$ .

1° Calculer le champ et l'induction à l'intérieur.

2° Un petit aimant est placé dans la bobine perpendiculairement à son axe. Sachant que son moment magnétique est  $0,4 \text{ Am}^2$ . Calculer le couple qui s'exerce sur lui.

29. 09. — (Voir fig. 227 à 232.) Le cadre carré comporte 40 spires, le courant est  $I = 5 \text{ A}$  et l'induction  $B = 0,3 \text{ T}$ . Calculer :

1° La force constante qui s'exerce sur chaque côté horizontal, longueur d'un côté 45 cm.

2° La valeur du couple (fig. 232) pour les valeurs suivantes de  $\theta$  :

$$0 - 30 - 45 - 60 \text{ et } 90^\circ$$

3° Le travail effectué pour chacune des rotations suivantes :

- a) de  $90^\circ$  à  $60^\circ$
- b) de  $60^\circ$  à  $30^\circ$
- c) de  $30^\circ$  à  $0^\circ$

## PHÉNOMÈNES D'AIMANTATION

### 202. Influence d'un noyau de fer placé dans un champ magnétique.

#### 1° L'induction est accrue.

— Utilisons à nouveau la bobine de 600 spires du paragraphe 190. Pour un courant de 0,5 A, une aiguille aimantée placée en P à 20 cm de la bobine dévie à peine (fig. 234), l'induction en P est faible.

Introduisons un morceau de fer dans la bobine, l'aiguille dévie franchement (fig. 235).

La présence du noyau de fer a donc considérablement augmenté l'induction au point P.

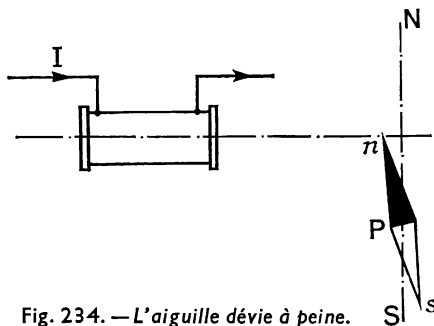


Fig. 234. — L'aiguille dévie à peine.

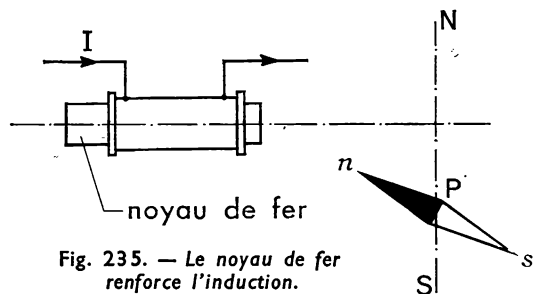


Fig. 235. — Le noyau de fer renforce l'induction.

#### 2° La distribution des lignes de force est modifiée.

— Dans un champ sensiblement uniforme (fig. 236), plaçons un noyau de fer, les lignes de force se resserrent, le tube de force s'étrangle

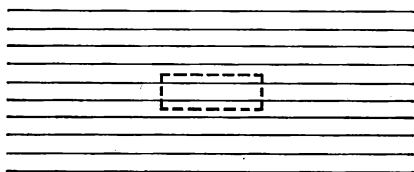


Fig. 236. — Le champ est uniforme.

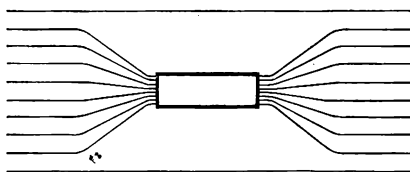


Fig. 237. — Le noyau de fer canalise les lignes de force.

pour traverser le fer (fig. 237). La section du tube de force est beaucoup plus petite dans le fer que dans l'air, l'induction  $y$  est donc beaucoup plus grande.

### 203. Aimantation induite.

1° Expliquons les phénomènes constatés. Lorsqu'un morceau de fer est placé dans un champ, ses dipôles magnétiques s'orientent sous l'influence du champ en renforçant l'induction  $B_0$  qui était produite

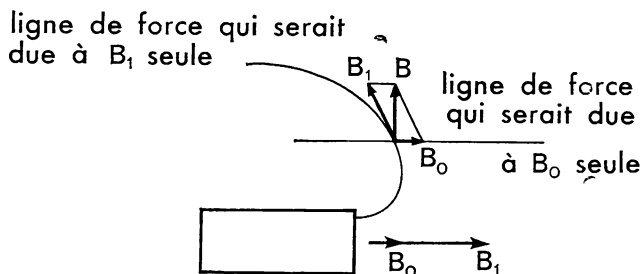


Fig. 238. — L'induction en un point résulte de  $B_0$  et de  $B_1$ .

par celui-ci. En tout point de l'espace l'induction totale résulte de celle qui existait avant la présence du fer et de celle qui est produite par l'aimantation de celui-ci (fig. 238).

L'aimantation du fer est appelée aimantation induite (sous-entendu par le courant).

2° **Apparition de pôles.** — Aux extrémités du morceau de fer l'aimantation induite a créé des pôles Nord et Sud (fig. 239).

A l'extérieur du fer ce sont ces pôles qui créent l'induction  $B_1$  et modifient la distribution des lignes de force. A l'intérieur du fer l'induction résulte de  $B_0$ , de l'aimantation qui existerait si le morceau de fer était très long (donc les pôles très éloignés) et de l'induction produite par les pôles.

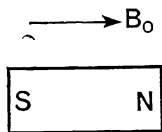


Fig. 239. — L'aimantation induite créée des pôles.

Noter que  $B_1$  est beaucoup plus grand que  $B_0$  à tel point que  $B_0$  est souvent négligeable devant  $B_1$ .

3° **Champ démagnétisant.** — Cette induction produite dans le fer par les pôles est opposée à l'in-



duction résultante et a contribué à diminuer celle-ci; pour cette raison le champ magnétique correspondant est appelé **champ démagnétisant**.

Si le morceau de fer est très long l'induction démagnétisante est négligeable au centre mais, sur les faces terminales, elle réduit l'induction résultante  $B$  à la moitié environ de sa valeur au centre, comme pour un solénoïde (fig. 240).

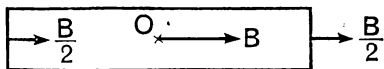


Fig. 240. — L'induction sur les faces n'est plus que  $\frac{B}{2}$ .

### 204. Aimant permanent.

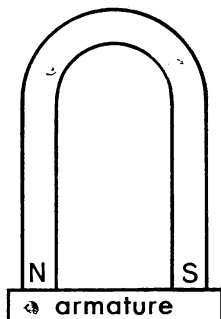


Fig. 241. — Aimant et son armature.

Un aimant permanent est un morceau d'acier (le plus souvent allié à d'autres métaux) qui conserve une grande partie de son aimantation induite quand on supprime le champ excitateur. Ses faces créent aussi en tout point intérieur un champ démagnétisant qui « use » peu à peu l'aimantation. C'est pourquoi un aimant inutilisé doit toujours être muni de son armature qui ferme le « circuit magnétique » et fait ainsi disparaître l'aimantation libre qui existait sur les pôles (fig. 241).

### 205. Point de Curie.

1° Lorsque l'on chauffe un clou attiré par un aimant, vers  $750^{\circ}\text{C}$  (rouge sombre) le clou cesse brusquement d'être attiré (fig. 242).

2° Une aiguille aimantée chauffée jusqu'à la même température et refroidie à l'abri de tout champ a perdu son aimantation.

3° Les propriétés magnétiques disparaissent donc à une certaine température, cette température est appelée point de Curie.

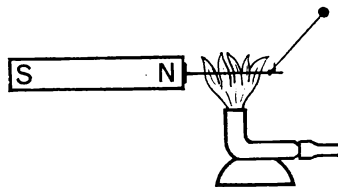


Fig. 242. — A  $750^{\circ}\text{C}$  le clou n'est plus attiré.

### 206. Courbe d'aimantation.

1° **Dispositif** (fig. 243). — Utilisons un anneau en fer doux n'ayant jamais été aimanté et ayant la forme d'une couronne cylindrique sur laquelle on a bobiné 800 spires.

Connaissant les dimensions de l'anneau, le nombre de spires et le courant nous pouvons calculer le champ intérieur :

$$H = n_1 I = \frac{NI}{l}$$

où nous prendrons  $l$  égal à la ligne de force moyenne (circonférence médiane).

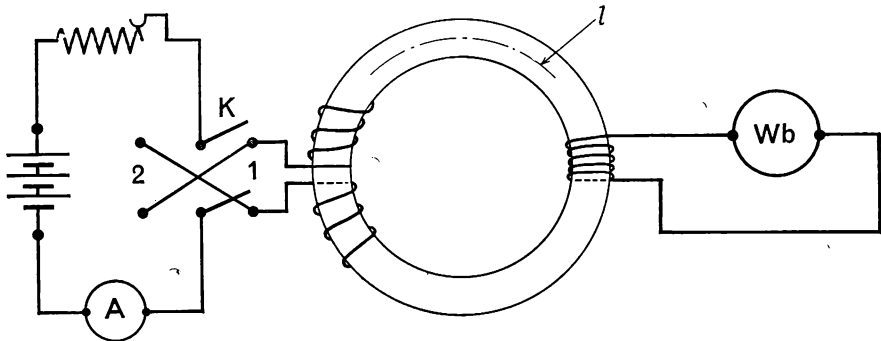


Fig. 243. — Dispositif pour le tracé de la courbe d'aimantation et du cycle d'hystérésis.

Le choix d'un anneau fermé est obligatoire si l'on veut s'affranchir du champ démagnétisant qui serait produit par les pôles si l'on utilisait un barreau droit.

Dimensions en millimètres de l'anneau utilisé :

- diamètre intérieur  $D_i = 180$ ;
- diamètre extérieur  $D_e = 240$ ;
- hauteur de la couronne  $e = 40$ ;
- diamètre moyen :  $\frac{180 + 240}{2} = 210$  mm;
- longueur de la circonférence moyenne :  $210 \times 3,14 = 660$  mm.

On a donc  $H = \frac{NI}{l} = \frac{800 I}{0,66} = 1\,210 I$ .

Quelques spires, 5 par exemple, seront enroulées séparément et serviront de bobine exploratrice pour le fluxmètre.

**2° Mesures.** — Donnons au rhéostat sa valeur maximale et fermons l'inverseur K en 1. Le courant passe de 0 à 0,2 A par exemple et le fluxmètre mesure la variation de flux :

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_{0,2} - \Phi_0 = \Phi_{0,2}$$

En diminuant la résistance du rhéostat passons de 0,2 A à 0,4 A, le fluxmètre mesure :

$$\Delta\Phi_2 = \Phi_{0,4} - \Phi_{0,2}$$

La somme  $\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2$  donne  $\Phi_{0,4}$ .

En continuant de proche en proche jusqu'à 5 A on peut ainsi relever le tableau des valeurs de I et de  $\Phi$ . La section S de l'anneau et le nombre de spires  $n$  de la bobine exploratrice étant connu on peut calculer B :

$$B = \frac{\Phi}{nS}$$

3° **Courbe  $B = f(H)$ .** — La courbe de l'induction dans le fer en fonction du champ est la courbe d'aimantation.

La courbe et le tableau des résultats sont donnés aux figures 244 et 245 (les 2 premières colonnes).

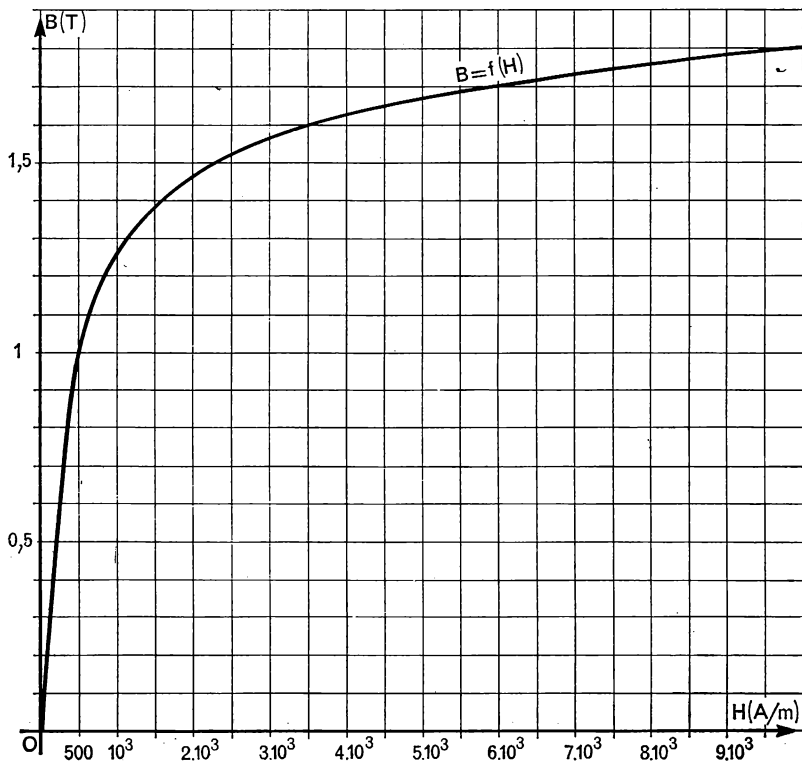


Fig. 244. — Courbe d'aimantation.

| H<br>(A /m)      | B<br>(T) | B.<br>(mT) | $\mu_r$ |
|------------------|----------|------------|---------|
| 500              | 1        | 0,625      | 1 600   |
| 625              | 1,1      | 0,78       | 1 410   |
| 800              | 1,2      | 1          | 1 200   |
| 1 100            | 1,3      | 1,37       | 945     |
| 1 600            | 1,4      | 2          | 700     |
| 2 300            | 1,5      | 2,87       | 520     |
| 3 500            | 1,6      | 4,37       | 365     |
| 6 200            | 1,7      | 7,75       | 220     |
| $10^4$           | 1,8      | 12,5       | 144     |
| $1,6 \cdot 10^4$ | 1,9      | 20         | 95      |

Fig. 245.

**4° Étude de la courbe.** — Jusqu'à 500 A/m environ la courbe est une droite passant par l'origine, induction et champ sont **proportionnels**. Ensuite l'induction croît de moins en moins vite, on dit que le fer se **sature**. Pour de très grandes valeurs de H la courbe serait à nouveau une droite mais ne passant plus par l'origine : le fer serait complètement saturé, les variations de l'induction seraient proportionnelles aux variations du champ.

## 207. Perméabilité d'une substance.

1° Calculons l'induction  $B_0 = \frac{n_1 I}{800\,000}$  qui serait produite dans le vide par le champ magnétique de la bobine, nous complétons ainsi la troisième colonne du tableau 245. Nous voyons que cette induction (attention elle est donnée en **milliteslas**) est toujours nettement plus petite que dans le fer.

Nous savions déjà que le fer augmentait l'induction qui serait produite sans lui. Tout se passe comme si le fer multipliait l'induction par un coefficient plus grand que 1, ce coefficient est appelé **perméabilité relative** du fer. On dit que le fer est plus perméable (aux lignes de force) que le vide.

**2° Définition.** — Pour un champ magnétique donné, la perméabilité relative  $\mu_r$  d'une substance est le quotient de l'induction qui y est produite par celle qui existerait dans le vide (ou l'air).

3° **Calcul.** — Pour un même champ  $H$ , on a donc :

$$(36) \quad \boxed{\mu_r = \frac{B}{B_0}} \quad (B \text{ et } B_0 \text{ en teslas})$$

EXEMPLE (5<sup>e</sup> ligne, fig. 245). —  $H = 1\,600 \text{ A/m}$      $B = 1,4 \text{ T}$  :

$$B_0 = \frac{H}{800\,000} = \frac{1\,600}{800\,000} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$\mu_r = \frac{1,4}{2 \cdot 10^{-3}} = 700$$

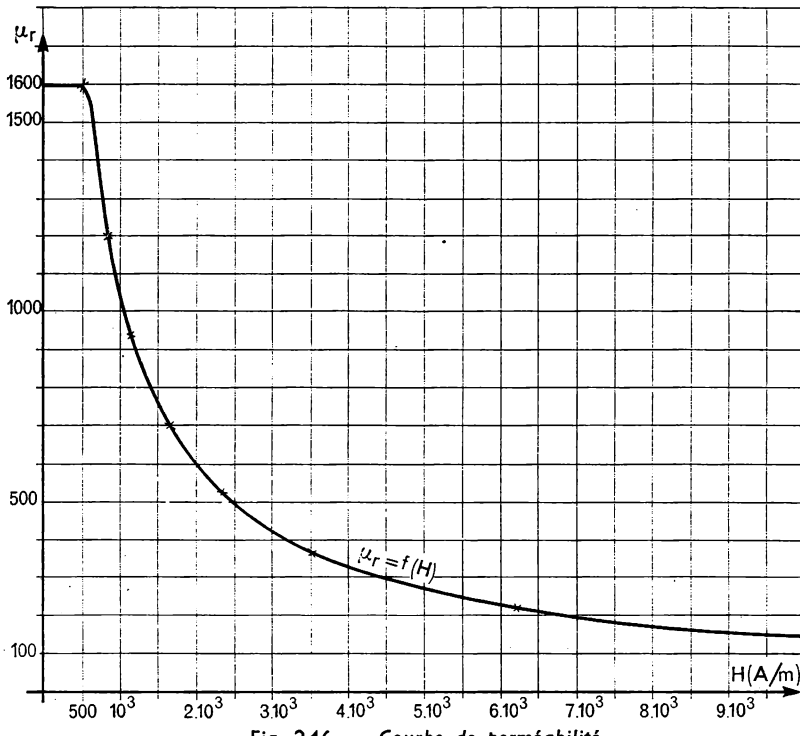


Fig. 246. — Courbe de perméabilité.

En calculant  $\mu_r$  pour toutes les valeurs du tableau 245 on complète la quatrième colonne.

On voit que la perméabilité n'est pas constante, elle décroît quand le champ augmente (le fer se sature).

On peut tracer la courbe 246 :  $\mu_r = f(H)$ .

4° **Perméabilité absolue.** — Rappelons que  $B_0 = \mu_0 H$  et  $B = \mu_r B_0$  on en déduit  $B = \mu_0 \mu_r H$ .

Le produit  $\mu_0 \cdot \mu_r$  de la perméabilité du vide par la perméabilité relative de la substance est la perméabilité absolue  $\mu_a$  :

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu_r$$

on peut écrire :

$$B = \mu_a H$$

REMARQUES. — a) Dans les tableaux de valeurs c'est toujours la perméabilité relative qui est donnée.

b)  $\mu_0$  et  $\mu_a$  sont des grandeurs physiques de même nature alors que  $\mu_r$  est un nombre abstrait.

5° **Classification des substances.** — Les substances se classent en deux catégories :

a) Celles qui ont une **perméabilité relative grande mais variable** avec le champ  $H$  par suite de la saturation : le fer, le nickel, le cobalt et leurs composés.

b) Celles qui ont une **perméabilité relative constante et égale à 1**, comme le vide : air, cuivre, aluminium, bois, etc.

C'est pourquoi toutes les formules données pour le vide sont valables dans l'air.

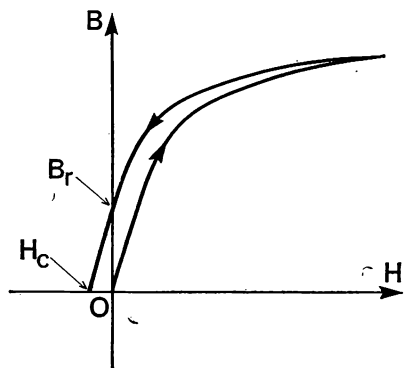


Fig. 247. — L'hystérésis dédouble les courbes d'aimantation.

## 208. Hystérésis.

1° En reprenant le dispositif de la figure 243 on peut, en partant de la valeur maximale du courant, tracer la courbe d'aimantation en faisant décroître  $I$ .

On constate que (fig. 247) :

a) Les valeurs prises par l'induction quand le champ excitateur décroît sont toutes supérieures à celles obtenues à champ croissant. Tout se passe comme s'il y avait un *retard* à la désaimantation, c'est ce retard que l'on nomme **hystérésis**.

b) Quand on annule le courant, donc le champ magnétisant, l'induction ne s'annule pas, elle conserve une certaine valeur : l'**induction rémanente  $B_r$** .

c) Pour annuler toute trace d'induction il faut inverser le courant, donc produire un champ inverse appelé **champ coercitif  $H_c$** .

**2° Cycle d'hystérésis.** — L'état magnétique d'une substance dépend non seulement du champ auquel elle est soumise mais aussi de tous les états d'aimantation antérieurs. Pour pouvoir étudier simplement les propriétés magnétiques il faut :

- a) « Effacer » les états d'aimantation antérieurs.
  - b) Faire varier le champ entre deux valeurs opposées  $+H$  et  $-H$ .
- On dit alors que l'on fait décrire à la substance un **cycle d'hystérésis**.

### 209. Tracé d'un cycle d'hystérésis.

**1° Dispositif expérimental.** — C'est toujours celui de la figure 243.

**2° Stabilisation du cycle.** — Pour annuler les anciennes traces d'aimantation on bascule une dizaine de fois l'inverseur d'une position à l'autre.

**3° L'inverseur étant dans la position 1,** on fait décroître le courant  $I$  de 5 A à 0 puis l'inverseur en position 2 de 0 à  $-5$  A.

Ensuite on fait croître  $I$  de  $-5$  à  $+5$ , le cycle est fermé.

**4° Allure du cycle.** — a) *Pour du fer doux* (fig. 248 a) : il est mince et la saturation est lente.

b) *Pour de la fonte* (fig. 248 b) : il est épais et la saturation est plus rapide.

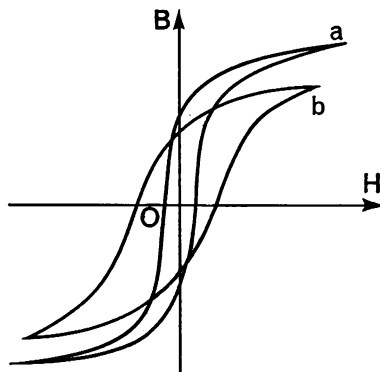


Fig. 248. — Cycles d'hystérésis :  
a — fer doux; b — fonte.

### 210. Inconvénient de l'hystérésis.

**1° L'hystérésis produit un dégagement de chaleur, donc une perte d'énergie.** On démontre que cette perte est proportionnelle à l'aire du cycle d'hystérésis, au volume de la substance et au nombre de cycles

décrits. En courant alternatif le champ s'inverse constamment et les substances décrivent de nombreux cycles (50 par seconde si la fréquence est de 50 Hz comme en France), les pertes seront donc importantes.

**2° Expression des pertes par hystérésis.** — Les pertes par unité de volume sont approximativement données par la formule de Steinmetz :

$$P = K f B_m^n$$

$K$  : varie de 100 à 500 pour les substances usuelles;

$f$  : nombre de cycles par seconde;

$B_m$  : induction maximale en teslas;

$n$  : exposant de  $B_m$ , égal à 1,6 pour les noyaux pleins et à 2 pour les tôles minces.

Pour réduire les pertes par hystérésis, on construit les machines avec des substances ayant un cycle étroit : tôles en fer additionné de silicium.

Calculons  $P$  pour des tôles de haute qualité :  $K = 100$  pour  $f = 50$  et  $B_m = 1$  on a :

$$P = 100.50.1 = 5\,000 \text{ W/m}^3$$

1 m<sup>3</sup> pèse environ 8 000 kg donc on perd à cause de l'hystérésis :

$$\frac{5\,000}{8\,000} = 0,62 \text{ W/kg}$$

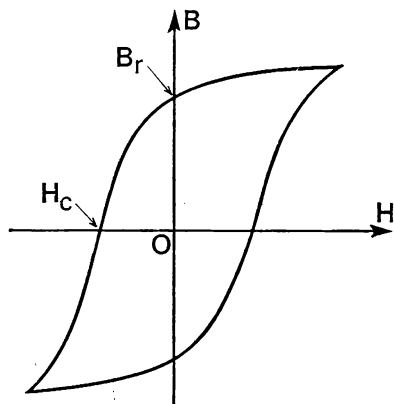


Fig. 249. — Cycle d'hystérésis d'un acier spécial pour aimant.

## 211. Avantages de l'hystérésis.

### 1° Amorçage des machines.

— Nous verrons que grâce à l'induction rémanente les machines peuvent s'amorcer seules.

### 2° Aimants permanents.

— C'est aussi grâce à l'hystérésis qu'il subsiste une aimantation rémanente et que l'on a pu fabriquer des aimants.

Un aimant doit avoir un cycle très épais (fig. 249) et :

a) une grande induction rémanente;

b) un grand champ coercitif pour ne pas perdre cette induction.

Grâce à des alliages spéciaux (ticonal par ex.) on a pu obtenir :

$$B_r = 1,3 \text{ T} \quad H_c = 31\,000 \text{ A/m}$$



## PROBLÈMES

---

### A RÉSOUDRE.

**30. 01.** — Avec le tableau ci-dessous relatif à un échantillon en fonte.

1° Tracer la courbe d'aimantation.

2° Calculer  $B_0$  et la perméabilité relative pour chaque valeur de  $H$ .

|         |   |     |       |       |       |       |       |       |       |
|---------|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H (A/m) | 0 | 750 | 1 000 | 1 500 | 2 000 | 2 500 | 3 000 | 4 000 | 5 000 |
| B (T)   | 0 | 0,5 | 0,65  | 0,85  | 0,98  | 1,07  | 1,13  | 1,23  | 1,28  |

**30. 02.** — Même problème que **31. 01** pour une tôle de haute qualité :

|         |   |     |      |       |       |       |       |       |        |
|---------|---|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| H (A/m) | 0 | 200 | 500  | 1 000 | 1 500 | 2 000 | 3 000 | 5 000 | 10 000 |
| B (T)   | 0 | 1   | 1,35 | 1,54  | 1,66  | 1,74  | 1,85  | 1,91  | 2      |

**30. 03.** — Pour une induction de 1,4 T et à 50 cycles par seconde les tôles utilisées dans la construction d'un alternateur produisent au kilogramme 3W de pertes par hystérésis. Calculer :

1° Les pertes volumiques (par  $m^3$ ) : masse volumique 7 600  $kg/m^3$ .

2° Le coefficient K de la formule de Steinmetz ( $n = 2$ ).

3° Les pertes volumiques qui seraient produites à 60 cycles par seconde pour une induction maximale de 1 T.

---

## INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

### 212. Étude qualitative.

1<sup>o</sup> **Expérience fondamentale.** — a) Figure 250 : Approchons, du pôle Nord d'un aimant, une bobine reliée à un millivoltmètre à point milieu, l'appareil dévie vers la droite.

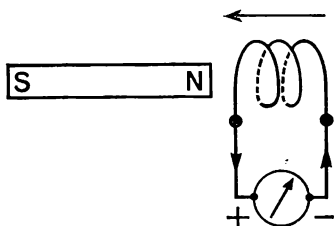


Fig. 250.

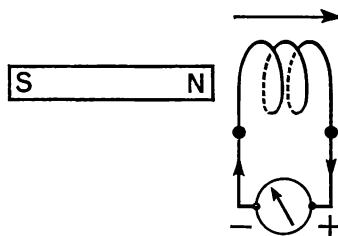


Fig. 251.

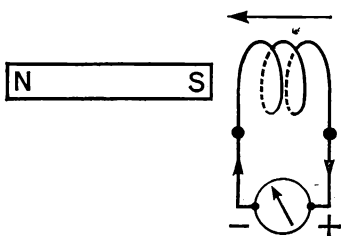


Fig. 252.

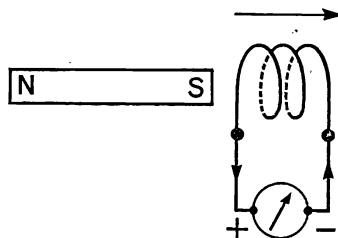


Fig. 253.

Fig. 250 à 253. — Le déplacement relatif de la bobine et de l'aimant engendre un courant induit.

b) Figure 251 : Éloignons la bobine, nous obtenons une déviation à gauche.

c) Figure 252 : Approchons du pôle Sud, déviation à gauche.

d) Figure 253 : Éloignons du pôle Sud, déviation à droite.

REMARQUE. — On peut aussi bien déplacer l'aimant.

**2° Interprétation.** — 1° Le millivoltmètre est traversé par un courant qui provient de la bobine. Celle-ci est donc le siège d'une **force électromotrice (f.é.m.)**.

2° Quand on approche la bobine de l'aimant, elle est traversée par une quantité croissante de lignes de force; elle se rapproche de la zone où l'induction  $\vec{B}$  est plus grande et par suite le flux qui la traverse augmente (fig. 254).

3° On vérifie expérimentalement que le courant commence avec le déplacement et finit avec lui. Il n'y a pas de courant quand le flux est constant.

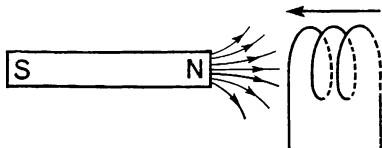


Fig. 254. — Quand on approche la bobine, le flux qui la traverse augmente.

**3° Terminologie.** — Le phénomène est appelé **induction électromagnétique**. La bobine est dite **induite**, le courant et la f.é.m. aussi.

L'aimant est le système inducteur.

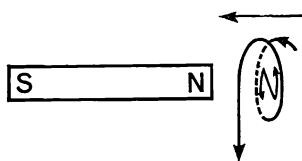


Fig. 255. — Le courant induit développe une face Nord.

**4° Sens du courant induit.** — Dès que la bobine est parcourue par un courant elle produit un champ magnétique qui lui est propre. Repérons le nom de la face qui est en regard du pôle d'aimant :

- a) On s'approche du Nord : face Nord (fig. 255).
- b) On s'éloigne du Nord : face Sud.
- c) On s'approche du Sud : face Sud.
- d) On s'éloigne du Sud : face Nord.

Dans tous les cas le courant crée une face qui tend à s'opposer au déplacement de la bobine.

### 213. Lois qualitatives.

**1° Loi de Faraday.** — Toute variation de flux à travers un circuit électrique fermé donne naissance à un courant appelé **courant induit**.

L'existence du courant coïncide avec celle de la variation de flux. Si le circuit est ouvert, il y a seulement une f.é.m. induite.

**2° Loi de Lenz.** — Le sens du courant induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui donne naissance.

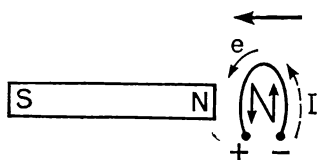


Fig. 256. —  $I$  est le courant qui existerait si la spire était fermée.

3° **Remarque importante.** — La bobine est un générateur, le courant y circule donc du **MOINS** vers le **PLUS**.

Si le circuit est ouvert il n'y a plus de courant mais on peut chercher le sens du courant qui existerait avec un circuit fermé (fig. 256). Le vecteur  $\vec{e}$  qui représente la f.é.m. induite a même sens que  $I$  (cf. § 100), c'est lui que désormais nous représenterons.

## 214. Expériences quantitatives.

1° **Dispositif utilisé.** — Conducteur rigide soutenu par des fils souples reliés à un millivoltmètre.

2° **Existence de la f.é.m.** — Quand on « balance » le conducteur perpendiculairement aux lignes de force, il coupe celles-ci et l'appareil dévie (fig. 257).

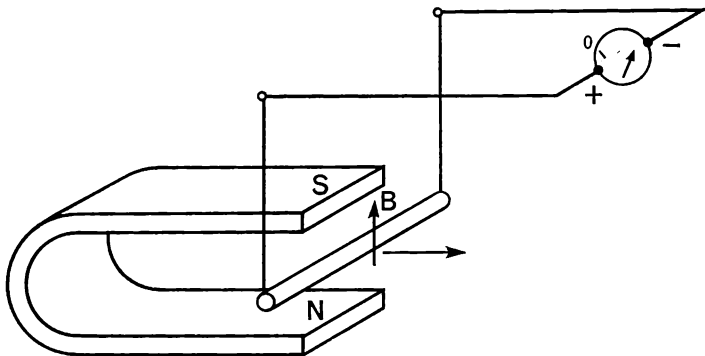


Fig. 257. — Le conducteur est le siège d'une f.é.m. induite quand on le déplace.

3° **Influence de la vitesse de déplacement.** — Un déplacement plus rapide donne une déviation plus grande.

4° **Influence de l'induction.** — Un aimant « plus fort » donne une déviation plus grande.

5° **Influence de la longueur utile du conducteur.** — Deux aimants identiques côte à côte donnent une même induction mais sur une longueur double : la déviation est plus grande.

6° **Direction du déplacement.** — La f.é.m. induite est nulle quand le conducteur ne coupe plus de lignes de force (fig. 258).

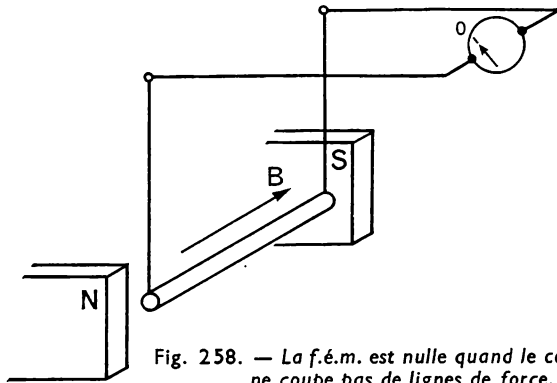


Fig. 258. — La f.é.m. est nulle quand le conducteur ne coupe pas de lignes de force.

### 215. F.E.M. induite dans un conducteur rectiligne.

1° **Conducteur rectiligne.** — La f.é.m. induite dans un conducteur rectiligne est proportionnelle :

- à l'induction;
- à la longueur active du conducteur;
- à la vitesse de déplacement.

(37)

$$e = Blv$$

$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ en teslas} \\ l \text{ en mètres} \\ v \text{ en m/s} \\ e \text{ en volts} \end{array} \right.$

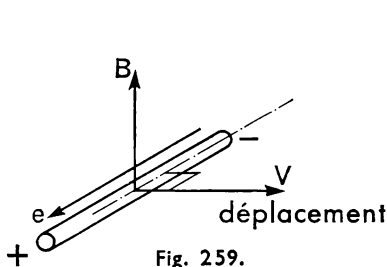


Fig. 259.

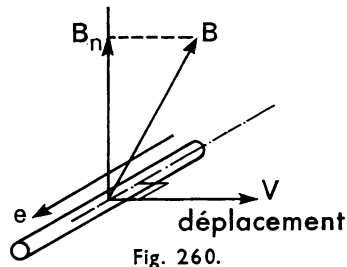


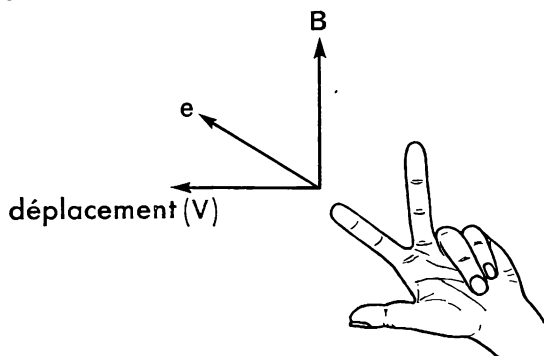
Fig. 260.

**REMARQUE.** — Cette formule n'est applicable que si les trois directions de  $\vec{B}$ ,  $l$  et  $v$  sont **perpendiculaires deux à deux** (fig. 259).

Si  $l$  et  $v$  restant perpendiculaires,  $B$  est oblique, il faut prendre  $\vec{B}_n$  la composante de  $\vec{B}$  qui est normale au plan déterminé par  $l$  et  $v$  (fig. 260).

2° **Règle des trois doigts de la main gauche** (fig. 261). — Elle permet de trouver le sens de la force électromotrice quand l'utilisation de la loi de Lenz n'est pas pratique.

La correspondance des doigts est la même que dans le paragraphe 182.



**pouce-déplacement**  
(ou vitesse)  
**index-intensité**  
(ou f.é.m.)  
**majeur-magnétisme**

Fig. 261. — Règle des trois doigts de la main gauche.

Pour savoir quelle main convient notons le procédé **mnémonique** <sup>(1)</sup>.

**Droite-Démarreur      Gauche-Générateur**

3° La formule 37 ne s'applique qu'à un conducteur rectiligne, modifions-la.

Supposons  $v = C^{te}$ ,  
au bout d'un temps  $t$   
le conducteur a subi un  
déplacement  $d$ :

$$d = vt$$

Le conducteur a ba-  
layé la surface (fig. 262):

$$S = ld$$

et coupé le flux :

$$\Phi = BS$$

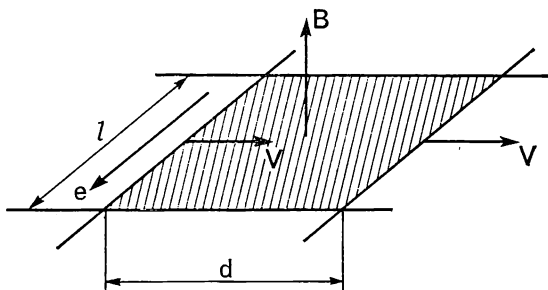


Fig. 262. — Le conducteur coupe le flux  $Bld$ .

En reportant dans la formule 37 :

$$e = Bl \frac{d}{t} = \frac{BS}{t} = \frac{\Phi}{t}$$

Si la vitesse varie, le flux n'est plus coupé uniformément et  $\frac{\Phi}{t}$  ne donne qu'une valeur moyenne.

(1) Mnémonique : qui aide la mémoire.

Pour connaître  $e$  à un instant donné il faut chercher la limite du rapport  $\frac{\Phi}{t}$  quand  $t$  tend vers zéro. Au cours d'un petit intervalle de temps  $\Delta t$  on coupe un petit flux  $\Delta\Phi$  et  $e$  est :

$$e = \limite \left[ \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right] \text{ quand } \Delta t \rightarrow 0.$$

On reconnaît la définition de la **dérivée du flux** par rapport au temps.

### **216. F.E.M. Induite dans un circuit quelconque.**

1° **Généralisation.** — La loi établie dans un cas simple est valable :

- si le circuit a une forme quelconque;
- si l'induction n'est pas constante;
- si la vitesse de déplacement est variable.

La loi est encore valable si le flux varie sans qu'il y ait déplacement.

2° **Formule fondamentale.** — Valeur moyenne de la f.é.m. induite :

$$(38) \quad \boxed{e_{\text{moy}} = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ en webers} \\ \Delta t \text{ en secondes} \\ e \text{ en volts} \end{array} \right.$$

$\Delta\Phi$  est le flux coupé ou la variation de flux.

3° **Autres formules.** — a) *Courant induit.* Si  $R$  est la résistance totale du circuit :

$$i = \frac{e}{R} = \frac{|\Delta\Phi|}{R \Delta t}$$

b) *Quantité d'électricité induite.* — Si le courant est  $i$  pendant le temps  $\Delta t$  :

$$q = i \Delta t = \frac{|\Delta\Phi|}{R} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi \text{ en webers} \\ R \text{ en ohms} \\ q \text{ en coulombs} \end{array} \right.$$

La quantité d'électricité induite ne dépend pas du temps.

4° **Remarque.** — Les phénomènes d'induction sont fondamentaux. C'est par induction dans les générateurs électriques tournants qu'est produite la quasi-totalité de l'énergie électrique.

## 217. Interdépendance des phénomènes électromagnétiques.

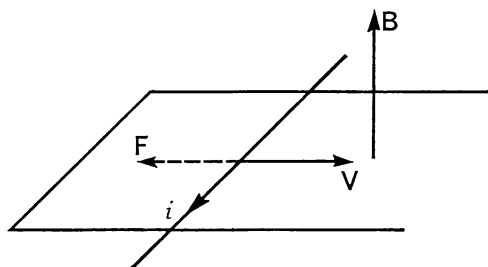


Fig. 263. — Dès qu'il y a courant induit une force électromagnétique résistante est développée.

1° Soit un conducteur déplacé dans un champ magnétique : il est le siège d'une f.é.m. induite. Si le conducteur appartient à un circuit fermé, cette f.é.m. produit un courant induit et, ce conducteur, traversé par ce courant et placé dans un champ, est soumis à une force électromagnétique

qui s'oppose au déplacement (fig. 263).

2° Soit un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique : il est soumis à une force électromagnétique.

Si le conducteur se déplace sous l'action de cette force il coupe des lignes de force et est le siège d'une f.é.m. induite de sens opposé à la tension extérieure  $U$  (fig. 264).

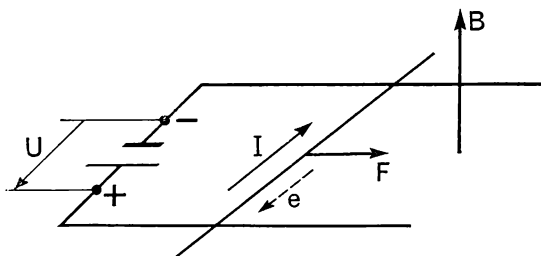


Fig. 264. — Dès que le conducteur se déplace il y a f.é.m. induite opposée à  $U$ .

**3° Conclusion.** — Donc dès que l'un des deux phénomènes, f.é.m. induite ou force électromagnétique est suivi d'effet, l'autre phénomène se manifeste également et tend à s'opposer à la cause du premier.

## 218. Signe de la F.E.M. induite.

a) La f.é.m. induite s'opposant à la cause qui lui donne naissance il est nécessaire de tenir compte de ce fait si l'on veut repérer cette f.é.m. par rapport à cette cause. Cette cause étant toujours, directement ou indirectement, une variation de flux la valeur algébrique de la f.é.m.



est de signe opposé à  $\Delta\Phi$ , car  $\Delta t$  est toujours positif et les formules 37 et 38 devront s'écrire :

(37 bis)

$$e = -Blv$$

(38 bis)

$$e_{\text{moy}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

b) **Valeur instantanée de la f.é.m.** : c'est la dérivée du flux par rapport au temps.

(39)

$$e = - \Phi'$$

Cette formule n'est utilisable que si l'on connaît une relation mathématique entre le flux et le temps.

### 219. Définition légale du Weber.

Elle est donnée par la formule 38 :

si on fait  $e = 1 \text{ V}$   $t = 1 \text{ sec}$  on a  $\Delta\Phi = 1 \text{ Wb}$

Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produit une force électromotrice de 1 V si on l'amène à zéro en une seconde par décroissance uniforme.

### 220. Courants de Foucault.

1<sup>o</sup> **Expérience.** — Un poids entraîne par l'intermédiaire d'un fil un disque pouvant tourner entre les pôles d'un électro-aimant (fig. 265).

- a) Quand l'interrupteur est ouvert le disque tourne rapidement.
- b) Fermons l'interrupteur : la vitesse de rotation devient très faible.

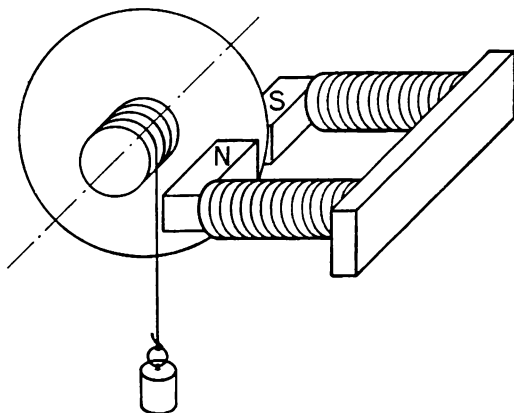


Fig.265. — La rotation est freinée quand l'électro-aimant est alimenté.

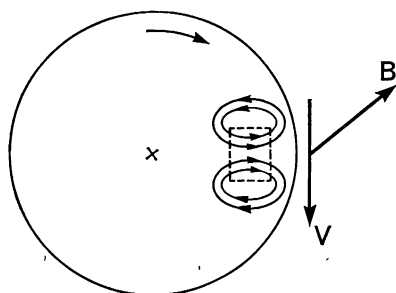


Fig. 266. — On vérifiera que les courants de Foucault s'opposent à la rotation.

**2° Explication.** — Le disque est conducteur, la tranche de disque qui passe entre les pôles coupe le champ et est ainsi le siège de courants induits qui se referment dans le disque. Ces courants s'opposent à la cause qui leur donne naissance : la rotation du disque (fig. 266).

Ces courants induits sont nommés **courants de Foucault**.

**3° Intérêt des courants de Foucault.** — Ils sont utilisés pour freiner des masses métalliques en mouvement.

- Amortissement d'appareils de mesure.
- Freinage du disque des compteurs d'énergie.
- Freinage de machines.

Ils sont aussi à l'origine du moteur le plus répandu : le **moteur asynchrone**.

**4° Inconvénients.** — A ces courants correspond une **perte d'énergie** par effet joule, donc proportionnelle à leur carré.

On réduit leur valeur en découpant en « tranches » perpendiculaires à leur direction les masses métalliques qui tournent dans des champs fixes ou qui sont fixes dans des champs variables. Ces masses métalliques sont formées de tôles isolées les unes des autres par du vernis.

Il en est ainsi des circuits magnétiques des machines, on dit qu'ils sont **feuilletés** (fig. 267).

Dans les matériaux magnétiques les pertes par courants de Foucault s'ajoutent aux pertes par hystérésis.

Les fabricants de tôles donnent globalement l'ensemble de ces pertes. Pour une induction maximale de 1 T et une fréquence de 50 Hz, ces pertes vont de 3 W/kg à 0,8 W/kg selon la qualité.

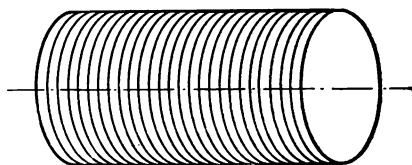


Fig. 267. — Le circuit magnétique est feuilleté.

## PROBLÈMES

### I. — AVEC SOLUTION.

**31. 01.** — Se reporter à la figure 262.

Le conducteur a une longueur utile de 0,8 m, sa vitesse est de 2 m/s et l'induction constante est 0,5 T.

1° Calculer directement la f.é.m. induite.

2° Calculer le flux coupé en 0,6 s.

3° Retrouver la valeur de la f.é.m.

— SOLUTION —

1° F.é.m. :  $\epsilon = Blv = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 2 = 0,8 \text{ V}$

2° Chemin parcouru :  $d = vt = 2 \times 0,6 = 1,2 \text{ m}$

Surface coupée :  $S = 0,8 \cdot 1,2 = 0,96 \text{ m}^2$

Flux coupé :  $\Phi = BS = 0,5 \cdot 0,96 = 0,48 \text{ Wb.}$

3° F.é.m. :  $\epsilon = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t} = \frac{0,48}{0,6} = 0,8 \text{ V}$

**31. 02.** — Les lignes de force d'un champ uniforme sont horizontales. Un cadre d'axe horizontal perpendiculaire à ces lignes peut tourner dans le champ. L'induction est  $B = 0,35 \text{ T}$ . Le cadre est un carré de 0,5 m de côté et comporte 40 spires dont la résistance totale est 2,5  $\Omega$ .

1° Calculer le flux embrassé par le cadre quand il est vertical.

2° On fait tourner ce cadre de  $90^\circ$  pour l'amener à la position horizontale en 0,1 s, calculer :

a) la f.é.m. moyenne induite; b) le courant correspondant; c) la quantité d'électricité induite.

— SOLUTION —

1° Flux :  $\Phi = BSN = 0,35 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 40 = 3,5 \text{ Wb}$

2° Flux coupé :  $\Delta\Phi = |0 - \Phi| = 3,5 \text{ Wb}$

a)  $\epsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{3,5}{0,1} = 35 \text{ V}$

b)  $i = \frac{\epsilon}{R} = \frac{35}{2,5} = 14 \text{ A}$

c)  $Q = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{3,5}{2,5} = 1,4 \text{ C}$

## II. — AVEC RÉPONSES.

**31. 03.** — Une bobine de 600 spires de  $8 \text{ cm}^2$  de section est placée dans un champ uniforme d'induction  $0,2 \text{ T}$ , son axe est parallèle au vecteur induction. Calculer la f.é.m. induite dans la bobine quand on annule le champ en  $0,05 \text{ s}$ .

Réponse :  $1,92 \text{ V}$

**31. 04.** — On place une bobine plate de 150 spires de  $4 \text{ cm}^2$  de section sous un pôle de machine qui produit une induction de  $1,4 \text{ T}$ . Calculer :

1° La quantité d'électricité induite sachant que la bobine a une résistance totale de  $4 \text{ ohms}$ .

2° La f.é.m. moyenne induite si l'opération a duré  $0,2 \text{ s}$ .

Réponses :  $21 \text{ mC}$ ;  $0,42 \text{ V}$

## III. — A RÉSOUDRE.

**31. 05.** — Effectuer le problème 31. 01 avec les données suivantes :

$$l = 25 \text{ cm} \quad v = 1,5 \text{ m/s} \quad B = 0,6 \text{ T} \quad t = 0,4 \text{ s}.$$

**31. 06.** — Effectuer le problème 31. 02 avec les données suivantes

$$B = 0,5 \text{ T. Côté du carré } 0,4 \text{ m} — 50 \text{ spires} — 4 \Omega — 0,05 \text{ s}.$$

**31. 07.** — L'axe d'une bobine de 750 spires de  $12 \text{ cm}^2$  est parallèle aux lignes de force d'un champ dont l'induction constante est  $B = 0,3 \text{ T}$ . Calculer :

1° Le flux embrassé par la bobine.

2° La f.é.m. induite quand on tourne l'axe de la bobine de  $180^\circ$  en  $25 \text{ ms}$ .

---

## INDUCTION PROPRE ET INDUCTION MUTUELLE

### 221. Inductance propre (L).

1° On sait que l'induction  $B_0$  produite dans le vide (ou l'air) par un circuit électrique est proportionnelle au courant qui parcourt ce circuit. Il en est de même du flux propre à travers ce circuit :

$\Phi$  proportionnel à  $I$ .

Le coefficient de proportionnalité est appelé inductance propre ou simplement **inductance** du circuit (fig. 268).



Fig. 268. — Symbole d'une inductance sans fer.

2° **Définition.** — L'inductance ( $L$ ) d'un circuit électrique est le quotient du flux propre total à travers le circuit par le courant qui y circule.

(40)

$$\boxed{L = \frac{\Phi}{I}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi \text{ en webers} \\ I \text{ en ampères} \\ L \text{ en henrys} \end{array} \right.$$

3° **Unité d'inductance : le henry (H).** — Le henry est l'inductance propre d'un circuit qui parcouru par un courant de 1 A est traversé par un flux propre de 1 Wb.

4° **Calcul d'inductance.** — Le calcul n'est facile que pour une bobine en forme de tore. Le résultat est approximativement valable pour une bobine longue.

Induction à travers la bobine :

$$B_0 = \mu_0 n_1 I = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

Flux à travers la section droite  $S$  (1 spire) :

$$\Phi = B_0 S = \mu_0 \frac{NIS}{l}$$

Flux total :

$$\Phi_t = N\Phi = \mu_0 \frac{N^2 IS}{l}$$

Inductance :

$$L = \frac{\Phi_t}{I} = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$$

$$(41) \quad \boxed{L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}} \quad \left\{ \begin{array}{l} S \text{ en m}^2 \\ l \text{ en mètres} \\ L \text{ en henrys} \end{array} \right.$$

APPLICATION NUMÉRIQUE :

$$N = 1\,200 \text{ spires} \quad S = 15 \text{ cm}^2 \quad l = 0,8 \text{ m}$$

Rappelons que  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  :

$$\begin{aligned} L &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1\,200 \cdot 1\,200 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{0,8} \\ &= 3,4 \cdot 10^{-3} = 3,4 \text{ mH} \end{aligned}$$

Pour une bobine placée dans le vide le henry est une grande unité.

## 222. F.E.M. auto-induite <sup>(1)</sup>.

1° **Existence.** — Lorsque le courant varie dans un circuit électrique, le flux propre varie aussi et la bobine est le siège d'une f.é.m. induite due aux variations de son flux propre, cette f.é.m. est auto-induite (fig. 269).

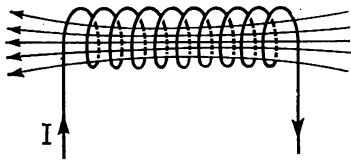


Fig. 269. — Quand  $I$  varie le flux propre varie aussi.

2° **Expression.** — La formule générale  $e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  est applicable, le flux étant proportionnel au courant  $\Phi = LI$ ,

les variations de flux le sont aussi :

$\Delta\Phi = L\Delta I$  et la formule devient :

$$(42) \quad \boxed{e_{\text{moy}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta I \text{ en ampères} \\ \Delta t \text{ en secondes} \\ L \text{ en henrys} \\ e \text{ en volts} \end{array} \right.$$

(1) En anglais « auto » se dit « self », d'où le nom de self-induction pour le phénomène d'induction propre ou d'auto-induction. L'inductance propre est souvent appelée coefficient de self-induction, ce qui est admissible, mais aussi simplement « self », ce qui est incorrect.

Conditions :  $L$  doit être constant, donc la bobine indéformable et dans l'air.

3° Lorsque  $I$  est constant,  $\Delta I$  est nul et la f.é.m. auto-induite est nulle aussi.

Lorsque  $I$  varie,  $\Delta I$  n'est plus nul et la f.é.m. auto-induite de signe opposé à celui de  $\Delta I$  « combat » les variations de  $I$ .

### 223. Conséquences.

1° **Bobine avec noyau de fer.** — Le flux qui existe dans le vide est multiplié par la perméabilité relative, l'inductance aussi :

$$L = \mu_r L_0 \quad (L_0 \text{ dans le vide})$$

mais  $\mu_r$  n'est pas constant et on ne peut plus écrire  $\Delta\Phi = L\Delta I$  sauf si le noyau n'est pas saturé.

Remarquons que si  $\mu_r$  est de l'ordre de 1 000,  $L = 1\,000 L_0$  et les millihenrys des bobines dans l'air deviennent des henrys s'il y a du fer. La f.é.m. auto-induite va prendre des valeurs importantes.

EXEMPLE. — Si  $L = 10 \text{ H}$  et que  $I$  varie de  $5 \text{ A}$  en  $0,1 \text{ s}$ , en supposant le fer non saturé, on aura :

$$e = \left| L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = 10 \cdot \frac{5}{0,1} = 500 \text{ V}$$

2° **Établissement du courant dans un circuit.** — a) *Circuit purement résistant.* — Le courant s'établit presque instantanément et prend sa valeur permanente  $I = \frac{U}{R}$ .

b) *Circuit inductif.* — L'établissement du courant est combattu par la f.é.m. auto-induite et le courant n'atteint sa valeur  $I = \frac{U}{R}$  qu'au bout d'un temps d'autant

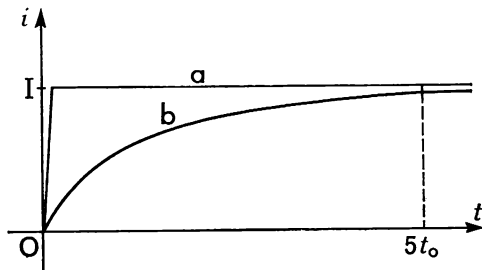


Fig. 270. — Établissement d'un courant.

a) dans une résistance,  
b) dans un circuit inductif.

plus long que le rapport  $\frac{L}{R}$  de l'inductance du circuit à sa résistance est plus grande.

Le rapport  $\frac{L}{R} = t_0$  s'appelle **constante de temps** du circuit. La valeur permanente de  $I$  est pratiquement atteinte après un temps égal à  $5 t_0$  (fig. 270).

**3° Suppression du courant.** — Quand on veut annuler le courant en ouvrant l'interrupteur  $\Delta I$  est négatif et la f.é.m. auto-induite retarde l'instant où le courant s'annule (fig. 271).

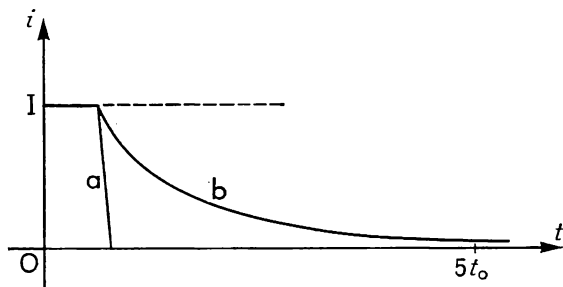


Fig. 271. — Suppression du courant :  
a) dans une résistance; b) dans un circuit inductif.

Effectuons le montage suivant : entre les bornes d'une bobine montée sur un noyau de fer plaçons un tube au néon qui ne s'allume que pour

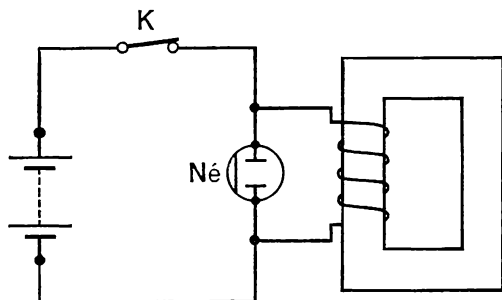


Fig. 272. — Quand on ouvre K la lampe s'allume.

une tension de 100 V. Alimentons avec une batterie de 24 V, le tube ne s'allume pas (fig. 272). Ouvrons K, le tube jette un bref éclair. La tension entre ses bornes a donc atteint une centaine de volts due à la f.é.m. auto-induite de la bobine.

Quand le tube n'existe pas la f.é.m. se trouve reportée entre les bornes de l'interrupteur et produit une étincelle de rupture importante qui endommage peu à peu l'interrupteur, c'est la raison pour laquelle les interrupteurs qui ouvrent des circuits inductifs comportent un pare-étincelles qui coupe brusquement le circuit et qui coûte moins cher à changer que l'interrupteur complet.



**4° Résistance non inductive (fig. 273).** — Pour obtenir une résistance dépourvue d'inductance, on bobine le fil après l'avoir doublé (fig. 274), les champs créés par deux spires voisines sont opposés, le flux propre est nul et l'inductance aussi.



Fig. 273. — Symboles : a) d'une résistance pure; b) d'une résistance pouvant présenter de l'inductance.



Fig. 273.

Fig. 274. — Bobinage d'une résistance non inductive.

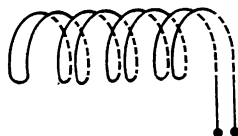


Fig. 274.

**5° Conclusion.** — En courant continu l'auto-induction ne se manifeste que pendant les *régimes transitoires* (quand  $I$  varie).

En courant variable et en courant alternatif elle se manifeste en permanence et sa valeur intervient dans les lois des circuits électriques contenant des inductances.

#### \* 224. Inductance mutuelle.

**1° Nouvelles expériences d'induction électromagnétique.** — Soient deux bobines, sans aucune liaison électrique, placées au voisinage l'une de l'autre (fig. 275).

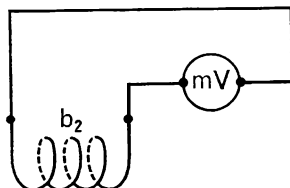
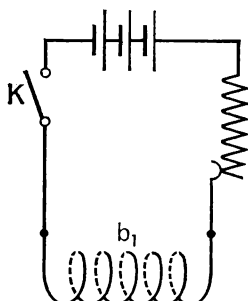


Fig. 275. — A la fermeture de  $K$  le millivoltmètre dévie.

La première,  $b_1$  est alimentée par une batterie d'accumulateurs, c'est la bobine inductrice.

La deuxième,  $b_2$  est reliée à un millivoltmètre, c'est la bobine induite. Effectuons une à une les manœuvres suivantes :

a) Fermeture de  $K$ .

b) Augmentation du courant  $I$  à l'aide du rhéostat.

c) Rapprochement des deux bobines.

d) Introduction d'un noyau de fer dans  $b_1$  ou  $b_2$ .

A chaque fois le millivoltmètre dévie et toujours dans le même sens. On vérifiera sans peine que chacune de ces manœuvres produit une augmentation du flux arithmétique qui traverse  $b_2$ .

Les opérations inverses produiraient un courant induit de sens contraire par diminution du flux.

2° **Flux mutuel.** — La bobine  $b_2$  est donc traversée par un flux en provenance de  $b_1$  (fig. 276).

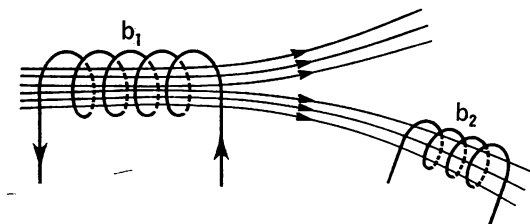


Fig. 276. —  $b_2$  est traversée par un flux provenant de  $b_1$ .

Si on alimentait  $b_2$ , c'est  $b_1$  qui serait traversée par un flux en provenance de  $b_2$ .

On peut donc produire un courant induit dans une bobine en faisant varier le courant qui parcourt une autre bobine. La f.é.m. induite obtenue est appelée **f.é.m. mutuelle**, elle est due aux variations du **flux mutuel**.

3° **Définition.** — L'inductance mutuelle ( $M$ ) entre deux circuits est le quotient du flux qui traverse l'un d'eux par le courant qui parcourt l'autre. On démontre que l'inductance mutuelle est la même quel que soit le circuit alimenté.

$$\boxed{M = \frac{\Phi_{1/2}}{I_1} = \frac{\Phi_{2/1}}{I_2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi \text{ en webers} \\ I \text{ en ampères} \\ M \text{ en henrys} \end{array} \right.$$

$\Phi_{1/2}$  veut dire : flux qui traverse le circuit 2 en provenance du circuit 1.

L'unité est la même que celle de l'inductance propre : le *henry*.

\* **225. Coefficient de couplage.**

1° **Variation de l'inductance mutuelle.** —  $M$  varie avec la forme des circuits et avec leur position relative.

Si deux circuits sont à plusieurs mètres l'un de l'autre  $M$  est faible.

La mutuelle est maximale quand les deux circuits sont bobinés sur un même axe et enchevêtrés (fig. 277).

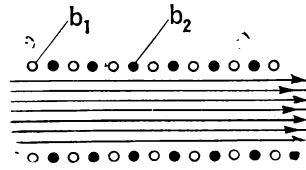


Fig. 277. — Tout le flux produit par  $b_1$  traverse  $b_2$ .

2° **Mutuelle maximale.** — La mutuelle maximale entre deux circuits est la moyenne proportionnelle de leurs inductances propres :

$$M_m = \sqrt{L_1 L_2}$$

{  $L_1, L_2$  et  $M$  en henrys

3° **Coefficient de couplage.** — Le coefficient de couplage entre deux circuits est le quotient de leur inductance mutuelle par la racine carrée du produit de leurs inductances.

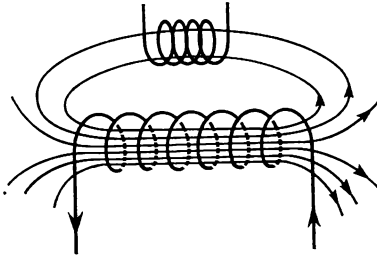


Fig. 278. — Le coefficient de couplage est faible.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{M_m}$$

On a donc toujours  $K \leq 1$ .

Si  $K$  est voisin de 1 : le couplage est serré.

Si  $K$  est petit (quelques centièmes) : le couplage est lâche.

Ordre de grandeur de  $K$  :

Deux bobines sur un même circuit magnétique fermé : presque 1.

Deux bobines bout à bout sans fer : 0,5.

Deux bobines côte à côte : 0,05 (fig. 278).

\* **226. F.E.M. Mutuelle induite.**

1° Les variations du courant dans une bobine produisent une f.é.m. induite dans l'autre (expérience du § 224 : cas  $a$  et  $b$ ).

2° Les variations de la mutuelle (à courant constant) produisent aussi une f.é.m. induite (cas  $c$  et  $d$ ).

3° **Formule.** — Supposons  $M$  constant (bobines fixes, pas de fer) :

$$\Phi_{1/2} = MI_1 \text{ donc } \Delta\Phi_{1/2} = M\Delta I_1$$

la f.é.m. induite est toujours  $e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  soit :

(43)

$$e_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta I_1 \text{ en ampères} \\ \Delta t \text{ en secondes} \\ M \text{ en henrys} \\ e_2 \text{ en volts} \end{array} \right.$$

4° Quand il y a du fer la formule reste à peu près valable si le circuit n'est pas saturé, sinon les variations de perméabilité produisent des variations de l'inductance mutuelle.

On peut néanmoins écrire :

$$M = \mu_r M_0 \quad (M_0 \text{ dans le vide})$$

L'inductance mutuelle est évidemment beaucoup plus grande en présence de fer.

### 227. Énergie électromagnétique.

Une bobine (surtout avec noyau de fer) emmagasine de l'énergie quand le courant augmente et la restitue quand il diminue.

On démontre que cette énergie est donnée par la formule :

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L \text{ en henrys} \\ I \text{ en ampères} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$$

Cette énergie n'est jamais très grande mais si elle est restituée dans un temps très court  $\Delta t$ , la puissance mise en jeu  $P = \frac{W}{\Delta t}$  peut être importante.

EXEMPLE :

$$L = 5 \text{ H} \quad I = 4 \text{ A} \quad W = \frac{1}{2} 5 \cdot 4 \cdot 4 = 40 \text{ J}$$

$$\text{restituée en } \frac{1}{10} \text{ s} \quad P = \frac{40}{0,1} = 400 \text{ W.}$$

## PROBLÈMES

AVERTISSEMENT. — Pour varier les problèmes nous n'avons pas hésité à placer des bobines sur des noyaux de fer en supposant constante la perméabilité relative.

### I. — AVEC SOLUTION.

**32. 01.** — Une bobine en forme de tore comporte 1 200 spires de 8 cm<sup>2</sup> de section. La longueur de la circonférence moyenne de la bobine est 80 cm. Calculer :

1° L'inductance de la bobine.

2° La valeur de la f.é.m. auto-induite pendant les 3 centièmes de seconde que dure l'établissement d'un courant de 5 A.

— SOLUTION —

1° Inductance :

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1\,200^2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}}{0,8} = 1,8 \text{ mH}$$

2° F.é.m. auto-induite :

$$e_{\text{moy}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 1,8 \cdot 10^{-3} \frac{5}{0,03} = 0,3 \text{ V}$$

\* **32. 02.** — Deux bobines  $b_1$  et  $b_2$  ont respectivement des inductances  $L_1 = 2 \text{ mH}$  et  $L_2 = 8 \text{ mH}$  dans l'air. Leur inductance mutuelle est  $M = 3 \text{ mH}$ . Calculer :

1° Le coefficient de couplage entre les 2 bobines.

2° La f.é.m. mutuelle induite dans  $b_2$  quand un courant de 3 A s'établit dans  $b_1$  en 0,01 s.

— SOLUTION —

1° Inductance mutuelle maximale :

$$M_m = \sqrt{L_1 L_2} = \sqrt{2 \cdot 8} = 4 \text{ mH}$$

Coefficient de couplage :

$$K = \frac{M}{M_m} = \frac{3}{4} = 0,75$$

2° F.é.m. induite :

$$e_2 = \frac{M \Delta I}{\Delta t} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{3}{0,01} = 0,9 \text{ V}$$

\* 32. 03. — Deux bobines  $b_1$  et  $b_2$  placées sur un circuit magnétique ont dans l'air des inductances propres respectives  $L_1 = 2$  mH et  $L_2 = 3$  mH. En admettant que la perméabilité relative  $\mu_r = 1\ 600$  est constante et que le coefficient de couplage est égal à 1. Calculer :

- 1° Les inductances propres compte tenu de la présence du fer.
- 2° L'inductance mutuelle.
- 3° La f.é.m. induite dans  $b_2$  quand le courant  $I_1$  varie de 2 A en 1 s.

— SOLUTION —

1° Inductances propres :

$$L'_1 = \mu_r L_1 = 1\ 600 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 3,2 \text{ H}$$

$$L'_2 = \mu_r L_2 = 1\ 600 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 4,8 \text{ H}$$

2° Inductance mutuelle :

$$M = \sqrt{L'_1 L'_2} = \sqrt{3,2 \cdot 4,8} = 3,92 \text{ H}$$

3° F.é.m. induite :

$$e_2 = M \frac{\Delta I}{\Delta t} = 3,92 \frac{2}{1} = 7,84 \text{ V}$$

\* 32. 04. — Une bobine  $b_2$  de 200 spires de 5 cm<sup>2</sup> de section est placée à l'intérieur d'une bobine longue  $b_1$  comportant 800 spires par mètre et parcourue par un courant de 6 A. Les 2 bobines ont même axe. Calculer :

- 1° L'inductance mutuelle entre les 2 bobines.
- 2° La f.é.m. induite dans  $b_1$  quand on établit un courant de 4 A en 0,1 s dans  $b_2$ .

— SOLUTION —

1° Champ produit par  $b_1$  :

$$H = n_1 I_1 = 800 \cdot 6 = 4\ 800 \text{ A/m}$$

Induction :  $B_0 = \mu_0 n_1 I_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4\ 800 = 6 \text{ mT}$

Flux à travers  $b_2$  :

$$\Phi_{1/2} = B_0 S_2 N_2 = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 200 = 0,6 \text{ mWb}$$

Inductance mutuelle :

$$M = \frac{\Phi_{1/2}}{I_1} = \frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{6} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Remarque : M est indépendant du courant. La donnée  $I_1 = 6$  A est inutile mais elle facilite la solution. On aurait pu effectuer le calcul avec  $I_1$  quelconque.

2° F.é.m. induite :

$$e_1 = M \frac{\Delta I_2}{\Delta t} = 0,1 \cdot 10^{-3} \frac{4}{0,1} = 4 \text{ mV}$$

## II. — AVEC RÉPONSES.

32. 05. — Résoudre le problème 32. 01 avec les données suivantes :

900 spires — 10 cm<sup>2</sup> — 75 cm — 0,01 s — 8 A

Réponses : 1,35 mH; 1,08 V

\* 32. 06. — Résoudre le problème 32. 04 avec les données suivantes :  
 $b_2$  : 250 spires,  $6 \text{ cm}^2$ .  
 $b_1$  : 1 000 spires par mètre, courant  $I_1$ , courant  $I_2 = 3 \text{ A}$  établi en  $0,05 \text{ s}$ .

Réponses :                       $0,188 \text{ mH}$ ;     $11,3 \text{ mV}$

### III. A RÉSOUDRE.

32. 07. — En supposant que les formules d'une bobine infiniment longue lui sont applicables, calculer l'inductance propre d'un solénoïde sans fer :

$$l = 50 \text{ cm} \quad N = 650 \text{ spires} \quad S = 15 \text{ cm}^2$$

Quelle est la f.é.m. auto-induite pendant les 5 millièmes de seconde que dure l'établissement d'un courant de  $10 \text{ A}$ ?

\* 32. 08. — Deux bobines ont même axe. La bobine extérieure  $b_1$  comporte 1 300 spires par mètre. La bobine intérieure  $b_2$  de 300 spires a une section de  $12 \text{ cm}^2$ . Calculer :

1° Le flux embrassé par  $b_2$  quand  $I_1 = 4 \text{ A}$ .

2° L'inductance mutuelle  $M$ .

3° La f.é.m. induite dans  $b_2$  quand on supprime le courant  $I_1$  en  $0,02 \text{ s}$ .

\* 32. 09. — Sur un circuit en fer doux, de perméabilité constante  $\mu_r = 1\,500$ , de  $80 \text{ cm}$  de longueur et de  $14 \text{ cm}^2$  de section on place 2 bobines :

$b_1$  : 400 spires et  $b_2$  : 1 200 spires.

Calculer :

1° L'inductance propre de chaque bobine dans le vide puis compte tenu du fer.

2° L'inductance mutuelle sachant que  $K = 0,95$ .

3° La f.é.m. induite dans  $b_2$  quand le courant  $I_1$  varie de  $3 \text{ A}$  par dixième de seconde.

N. B. — Quand une bobine est montée sur un circuit magnétique sa longueur est celle du fer.

## APPAREILS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES

### 228. Galvanomètre à cadre mobile.

1<sup>o</sup> **Description** (fig. 279). — Un cadre mobile de  $N$  spires peut tourner entre les pôles d'un fort aimant (fig. 280), un cylindre en fer doux canalise les lignes de force et grâce à lui, dans l'entrefer, l'induction

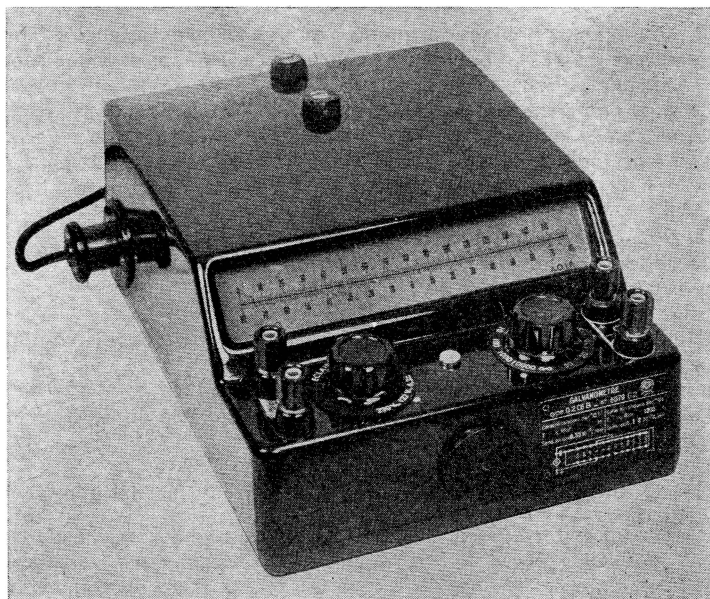


Fig. 279. — Galvanomètre.

Photo AOIP.

est sensiblement radiale et de valeur constante (fig. 281). Ce cadre est suspendu par deux fils méplats en bronze phosphoreux. Ces fils servent également à amener le courant au cadre et à développer un couple antagoniste quand on les tort. Un miroir est fixé sur le cadre.



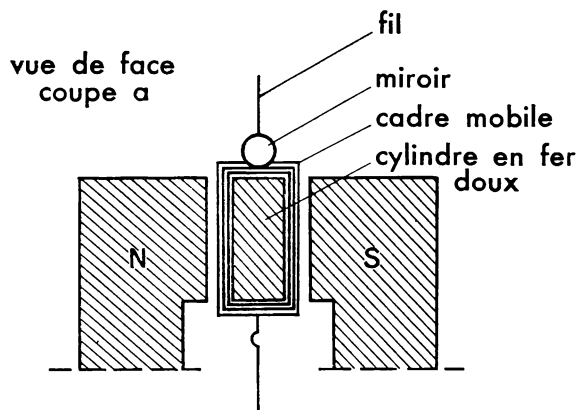


Fig. 280. — Vues d'un galvanomètre.

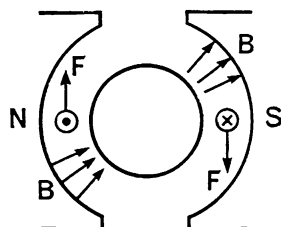


Fig. 281. — Dans l'entrefer l'induction est radiale.

**2<sup>o</sup> Principe.** — a) *Couple moteur.* — Soit une spire du cadre, les deux fils verticaux sont soumis à une force

$F = BIl$ , les deux forces forment un couple  $m = d.F = BIl d$  et si le cadre comporte  $N$  spires, le couple moteur total est  $M_m = BIl d N$ .

b) *Couple antagoniste (de rappel).* — C'est un couple de torsion dû aux fils de suspension, il est proportionnel à l'angle de rotation  $\theta$  et à la constante de torsion  $C$  des fils :

$$M_r = C\theta$$

c) *Position d'équilibre.* — Elle est atteinte quand les deux couples sont égaux :

$$C\theta = BIl d N$$

soit :

$$\theta = \frac{BIl d N}{C}$$

or  $B$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $N$  et  $C$  sont des éléments constants dans un galvanomètre donné, donc :

$$\frac{BIl d N}{C} = C^{\text{te}} = K$$

et :

$$\theta = KI$$

**L'angle de déviation est proportionnel au courant.**

d) *Amplification de la déviation.* — Le miroir est éclairé par une lampe et renvoie l'image de cette lampe sur une règle graduée. Cette image est appelée « spot » (en anglais spot = tache).

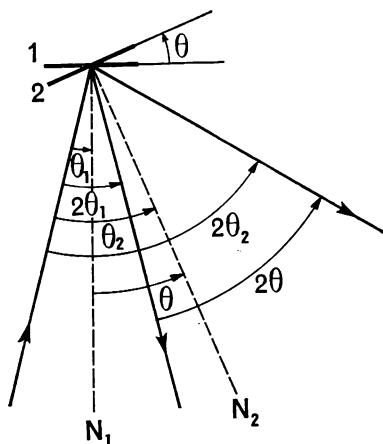


Fig. 282. — Quand le miroir tourne de  $\theta$  le rayon réfléchi tourne de  $2\theta$ .

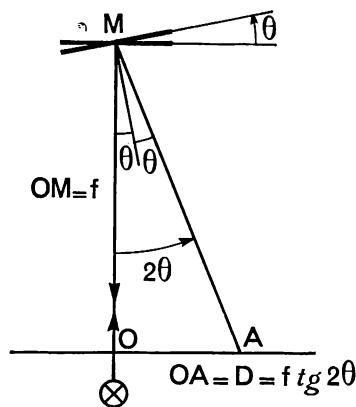


Fig. 283. — La déviation est  $f \tan 2\theta$ .

Quand le cadre et le miroir tournent d'un angle  $\theta$  le pinceau lumineux tourne d'un angle  $2\theta$  (fig. 282) et la déviation  $D$  est (fig. 283) :

$$D = f \tan 2\theta$$

Tant que  $\theta$  reste petit (quelques degrés), on peut admettre que  $\tan 2\theta \approx 2\theta$ , donc  $D = 2f\theta = 2/KI$ .

La déviation du spot est proportionnelle au courant.

3° **Sensibilité du galvanomètre.** — a) *Définition.* — La sensibilité d'un galvanomètre est le courant qui le parcourt quand le spot dévie de 1 mm.

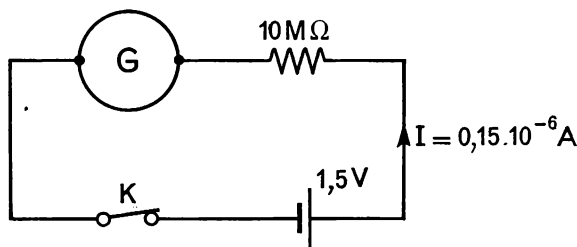


Fig. 284. — La déviation est de 150 mm.

Courant total :

$$i = \frac{1,5}{10 \cdot 10^6} = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

b) *Mesure.* — Alimentons un galvanomètre en série avec une résistance de  $10 \text{ M}\Omega$  par une pile de 1,5 V (fig. 284). Le spot dévie de 150 mm. La sensibilité est :

Courant pour 1 mm :

$$s = \frac{0,15 \cdot 10^{-6}}{150} = 10^{-9} \text{ A/mm} = 1 \text{ nA/mm}$$

Un galvanomètre permet donc de détecter des **courants extrêmement faibles**.

Selon le galvanomètre la sensibilité va de  $10^{-8}$  A/mm à  $10^{-11}$  A/mm.

La pile branchée directement aurait « grillé » l'appareil. On peut, pour mieux réaliser les ordres de grandeur, calculer la déviation théorique qu'elle donnerait dans ce cas. Un galvanomètre a une résistance de 1 000  $\Omega$  environ (nous l'avons négligée devant 10 M $\Omega$ ) le courant  $i$  serait :

$$i = \frac{1,5}{1\,000} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

et la déviation :

$$D = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-9}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ mm} = 1,5 \text{ km!}$$

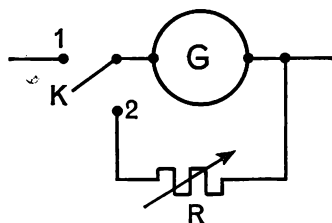


Fig. 285. — Après une déviation constante de 100 mm (K en 1) on place K en 2, R amortit les oscillations.

4° **Amortissement**. — Plaçons entre les bornes du galvanomètre une résistance variable (shunt), faisons sa valeur de l'infini (circuit ouvert) à zéro (court-circuit) et mesurons la durée du retour à l'équilibre après une déviation constante de 100 mm (fig. 285).

| R( $\Omega$ ) | $\infty$ | 10 000 | 1 000 | 400 | 100 | 10 | 0  |
|---------------|----------|--------|-------|-----|-----|----|----|
| t(s)          | 180      | 20     | 6     | 1   | 1,5 | 4  | 10 |

a) **Régime oscillant** (fig. 286 a). — Tant que  $R > 400 \Omega$ , le spot oscille autour de sa position d'équilibre avant de s'arrêter. La période ou durée

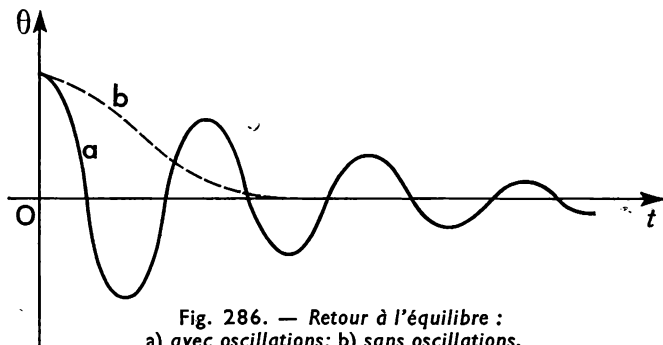


Fig. 286. — Retour à l'équilibre : a) avec oscillations; b) sans oscillations.

d'une oscillation complète aller-retour est toujours de 3 s environ mais le nombre d'oscillations diminue quand R diminue.

*b) Régime apériodique* (fig. 286 b). — Quand  $R < 400 \, \Omega$ , le spot revient à sa position d'équilibre sans la dépasser.

C'est pour  $R = R_c = 400 \, \Omega$  que ce retour est le plus rapide. La résistance mise en parallèle est la **résistance d'amortissement**.

La valeur  $R_c = 400 \, \Omega$  est appelée **résistance critique** d'amortissement.

*c) Raisons de l'amortissement.* — Le cadre est dans le champ de l'aimant, quand il se déplace il est le siège d'une f.é.m. induite «  $e$  ». Si le circuit du cadre est fermé sur une résistance, il y a un courant induit «  $i$  » qui freine le déplacement :

$$i = \frac{e}{R + g} \quad (g \text{ résistance du galvanomètre})$$

Si R est très grand,  $i$  est faible et le freinage aussi.

Si R est très petit,  $i$  est grand et le freinage aussi.

Dans ces deux cas extrêmes la durée de retour à l'équilibre est grande.

#### 5° Données sur un galvanomètre moderne.

Aimant :  $B = 0,3 \, \text{T}$ .

Cadre :  $N = 900$  spires; Surface :  $4 \, \text{cm}^2$ .

Ruban de suspension : largeur  $0,1 \, \text{mm}$ ; épaisseur  $0,01 \, \text{mm}$ .

Le galvanomètre a une sensibilité de  $10^{-9} \, \text{A/mm}$ .

La résistance propre de l'appareil est de  $1\,000 \, \Omega$  environ.

La résistance critique d'amortissement de  $400 \, \Omega$  environ.

6° **Utilisation.** — *a)* Un galvanomètre peut être utilisé pour mesurer de très faibles courants ou de très faibles tensions. Étant donné son extrême sensibilité il est surtout utilisé comme « **appareil de zéro** » : pour indiquer l'absence de courant dans un circuit de mesure.

*b)* Si l'on inverse le sens du courant, les forces de la figure 281 changent de sens et la déviation aussi. Avec un courant de sens variable le galvanomètre oscillerait autour de sa position d'équilibre ou vibrerait sans dévier. Il n'est donc pas utilisable en alternatif comme appareil de mesure.

## 229. Galvanomètre balistique.

1° **Description.** — C'est un galvanomètre ordinaire dont on a augmenté le moment d'inertie du cadre :

- soit en plaçant le grand axe horizontalement (fig. 287 a);
- soit en ajoutant des surcharges «  $m$  », éloignées de l'axe (fig. 287 b).

2° **Principe.** — La période des oscillations est ainsi accrue et atteint une dizaine de secondes.

Il en résulte que, avant que le cadre ait « démarré », on a le temps de lui envoyer toute la quantité d'électricité qui était contenue dans un condensateur (chap. 36) ou qui est induite dans une bobine par une variation de flux.

L'équipage mobile est alors lancé par un choc (percussion) comme une boule de billard.

L'amplitude, ou élongation, de la première oscillation est proportionnelle à la quantité d'électricité reçue et mesure celle-ci :

$$\theta = \frac{Q}{k}$$

$k$  est la constante du galvanomètre ou sensibilité en balistique.

Pour les galvanomètres actuels  $k$  va de  $10^{-7}$  C/mm à  $10^{-10}$  C/mm.

3° **Utilisation.** — a) *Mesure de quantités d'électricité.* — Si  $k$  est ignoré on fait un étalonnage préalable avec une quantité  $Q_1$  connue, le rapport des déviations est égal au rapport des quantités :

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad \text{d'où} \quad Q_2 = Q_1 \frac{\theta_2}{\theta_1}$$

b) *Mesure des flux et des inductions.* — Rappelons la formule  $Q = \frac{\Delta\Phi}{R}$ , connaissant la résistance du circuit, y compris la bobine exploratrice, on peut calculer  $\Delta\Phi$  :

$$\Delta\Phi = QR$$

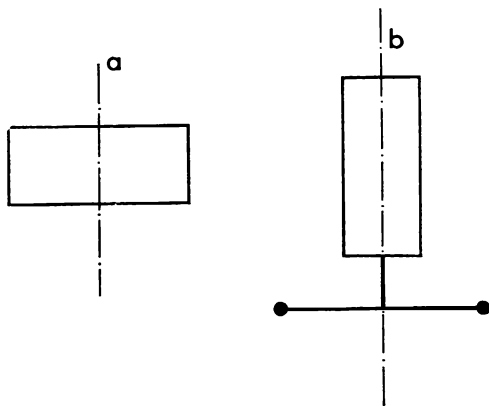


Fig. 287. — Deux procédés pour augmenter le moment d'inertie.

Le calcul de  $B$  est facile, si  $N$  est le nombre de spires de la bobine et  $S$  leur section :

$$B = \frac{\Delta\Phi}{NS} = \frac{QR}{NS}$$

*Possibilités.* — a)  $R$  est de l'ordre de 1 000  $\Omega$ , si  $k = 10^{-9}$  C/mm, pour 1 mm on peut mesurer  $\Delta\Phi = QR = 10^{-9} \cdot 10^3 = 10^{-6}$  Wb.

b) Pour  $N = 100$  spires et  $S = 2 \text{ cm}^2$  :

$$B = \frac{10^{-6}}{100 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 0,5 \text{ G}$$

Un galvanomètre balistique est donc plus sensible qu'un fluxmètre.

**4° Galvanomètres mixtes.** — On transforme aujourd'hui un galvanomètre en balistique par la mise en parallèle avec le cadre d'une résistance et d'une forte capacité (100  $\mu\text{F}$ ).

Un commutateur permet commodément le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre.

### 230. Ampèremètre magnéto-électrique.

**1° Description et principe.** — L'ampèremètre **magnéto-électrique** (on dit aussi à *cadre mobile*) fonctionne comme un galvanomètre et sa constitution n'en diffère que par les points suivants :

a) Les rubans de suspension du cadre, trop fragiles pour un appareil d'usage courant, sont remplacés (fig. 288) :

— par des pivots tournant dans des crapaudines en saphir pour fixer le cadre en position longitudinale;

— par deux ressorts spiraux pour développer un couple antagoniste proportionnel à l'angle  $\theta$  de rotation.

b) Le cadre mobile est bobiné sur une spire métallique qui sert à l'amortissement par courants de Foucault, l'appareil est apériodique.

c) L'amplification de la déviation est obtenue par une aiguille qui remplace le système optique. La déviation étant proportionnelle au courant (comme pour le galvanomètre) les divisions de l'appareil sont égales. On dit que la graduation est **linéaire**.

**2° Utilisation.** — a) Nous avons déjà utilisé un ampèremètre. Le courant qui correspond à la déviation maximale est de l'ordre du centième d'ampère, il est donc nécessaire d'utiliser des shunts. Ceux-ci sont en manganine ou en constantan.

Le calcul d'un shunt a été traité au paragraphe 91.

b) Comme le galvanomètre, l'ampèremètre à cadre mobile ne fonctionne qu'en continu. On a étendu son usage au courant alternatif en « redressant » ce dernier par des *redresseurs* incorporés à l'appareil.

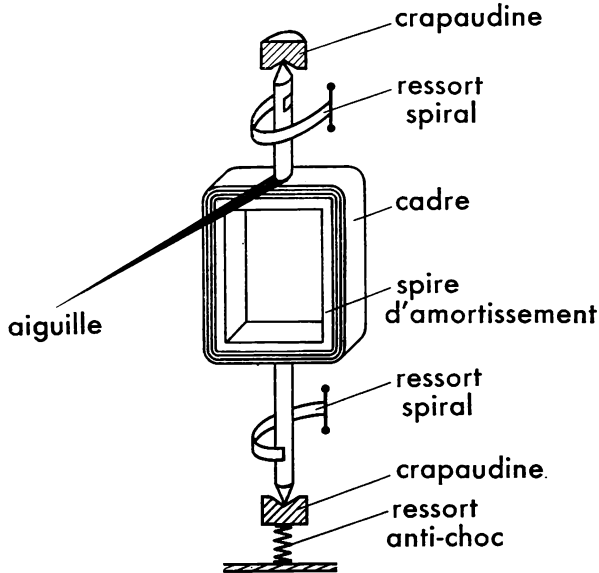


Fig. 288. — Cadre mobile d'appareil magnéto-électrique.

### 231. Voltmètre magnéto-électrique.

1<sup>o</sup> **Description, principe et cadran.** — Il n'y a aucune différence avec l'ampèremètre.

2<sup>o</sup> **Utilisation.** — a) Nous avons déjà utilisé un voltmètre. La chute de tension dans le cadre est du même ordre de grandeur que celle d'un ampèremètre, il est donc nécessaire d'adjoindre à l'appareil des résistances additionnelles (voir § 85).

b) Son usage en alternatif nécessite également l'adjonction de redresseurs (1).

(1) Consulter le paragraphe 236 : propriétés communes aux appareils.

### 232. Fluxmètre.

1° **Description.** — Il est constitué comme un galvanomètre mais :

a) Il est peu résistant.

b) Il ne comporte ni fil de torsion, ni ressorts spiraux. Le couple de rappel est donc nul : après une déviation le cadre ne revient pas au zéro, il est en **équilibre indifférent en toute position.**

2° **Principe.** — L'appareil est utilisé avec des bobines exploratrices ayant toutes la même surface totale :  $n_1 S_1 = n_2 S_2 = n_3 S_3$ , donc pour une même variation de l'induction on a toujours la même variation de flux  $\Delta\Phi$ , ce qui permet d'avoir une graduation unique du cadran.

On démontre que la déviation  $\theta$  est proportionnelle à cette variation de flux et indépendante de la résistance de la bobine (il y a toutefois une valeur maximale à ne pas dépasser). Donc :

$$\theta = K \Delta\Phi$$

L'appareil est gradué en webers (ou en maxwells). Une division correspond le plus souvent à :

$$10^{-4} \text{ Wb} = 10\,000 \text{ Mx}$$

Le fluxmètre est donc assez peu sensible.

3° **Utilisation.** — Le fluxmètre permet la mesure des variations de flux et par suite des inductions. Une pile est placée dans l'appareil, elle permet de lancer un courant dans le cadre pour ramener celui-ci au zéro <sup>(1)</sup>.

---

(1) Revoir au chapitre 27 l'usage du fluxmètre.



## APPAREILS FERROMAGNÉTIQUES ET ÉLECTRODYNAMIQUES

### 233. *Ampèremètre ferromagnétique (à fer mobile).*

1° **Premier type** (fig. 289) — *a*) Deux plaques en fer doux, F fixe et M mobile, sont placées à l'intérieur d'une bobine traversée par le courant à mesurer ou un courant proportionnel. La plaque mobile entraîne l'équipage mobile : aiguille et piston amortisseur. Deux ressorts spiraux créent le couple antagoniste.

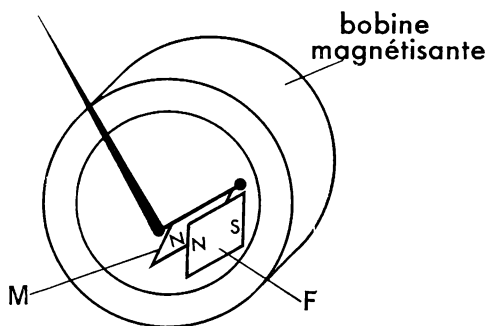


Fig. 289. — Appareil ferro-magnétique du premier type.

*b*) Lorsque la bobine est traversée par un courant, elle produit un champ magnétique. **Les deux plaques s'aimantent dans le même sens et se repoussent**, la plaque mobile s'écarte de la plaque fixe.

*c*) La graduation n'est pas linéaire. Au début les divisions sont plus serrées.

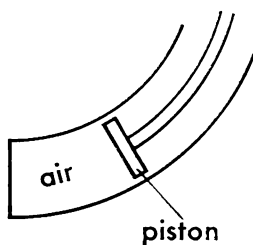


Fig. 290. — Amortisseur d'air.

*d*) L'amortissement de l'appareil est assuré par un piston qui entre dans une chambre à air (fig. 290).

2° **Deuxième type** (fig. 291). — *a*) Un noyau en fer doux, mobile, entraîne l'équipage.

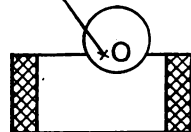


Fig. 291. — Appareil ferro-magnétique du deuxième type.

*b*) Lorsque la bobine est traversée par un courant, elle produit un champ magnétique, **le noyau s'aimante et « plonge » dans la bobine.**

c et d) La graduation et l'amortissement sont analogues à ceux du premier type.

**3° Utilisation.** — a) L'ampèremètre est utilisable en courant continu et en courant de sens variable (alternatif). En effet si le sens du courant dans la bobine est inversé les deux plaques du premier type se repoussent toujours et le noyau du second type est toujours attiré.

b) Selon les appareils, la même graduation est valable en continu et en alternatif ou au contraire il y a deux graduations différentes.

Il est important de noter que le fer doux utilisé pour les plaques et le noyau doit être pratiquement **dépourvu d'hystérésis**.

### 234. Voltmètre ferromagnétique.

La seule différence avec un ampèremètre est que la bobine qui produit le champ est en fil fin avec beaucoup de spires au lieu d'être en fil gros avec peu de spires. On s'explique facilement ce fait : pour avoir une même déviation dans les deux cas il faut développer le même couple moteur, donc avoir le même champ c'est-à-dire le même nombre d'ampères-tours.

### 235. Wattmètre électrodynamique.

**1° Description** (fig. 292). — Une bobine fixe est alimentée par le courant  $I$  et une bobine mobile, en série avec une résistance, est traversée par un courant  $i$  proportionnel à la tension  $U$ . L'amortissement est obtenu comme dans les appareils ferro-magnétiques.

**2° Principe.** — *La bobine mobile tend à s'orienter dans le champ que produit la bobine fixe en obéissant à la règle du flux maximal* (fig. 293). Le couple moteur est proportionnel au produit «  $Ii$  » :

$$M_m = kIi = kI \frac{U}{R} = k \frac{P}{R} = KP$$

$P$  étant la puissance à mesurer et  $R$  la résistance du circuit tension.

Le couple antagoniste est proportionnel à la déviation :

$$M_r = C\theta$$

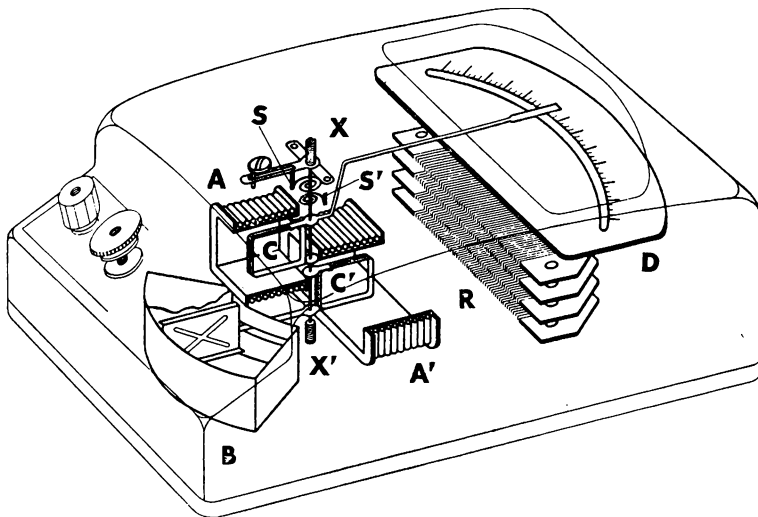


*Photo Chauvin Arnoux.*

Fig. 292. — Vue intérieure d'un wattmètre électrodynamique.

à l'équilibre :

$$C\theta = KP \quad \theta = \frac{K}{C} P$$

**La déviation est proportionnelle à la puissance.**

Les divisions du cadran sont égales.

**3° Calibres.** — Les wattmètres usuels possèdent plusieurs calibres de tension et deux calibres intensités.

Le wattmètre de la figure 45 (§ 53) possède les calibres suivants :

U : 15, 30, 75, 150, 300, 450

I : 5 et 10.

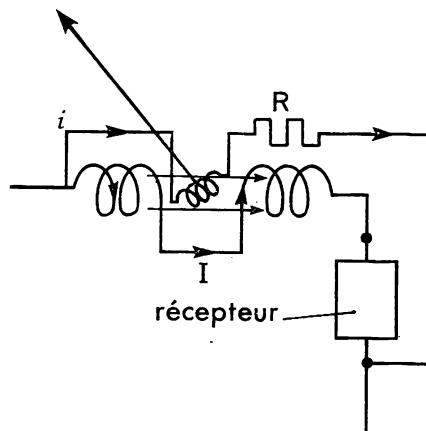


Fig. 293. — Wattmètre électrodynamique.

On peut donc mesurer de  $15 \cdot 5 = 75 \text{ W}$  à  $450 \cdot 10 = 4\,500 \text{ W}$  avec le même appareil.

Noter que les calibres U et I sont indépendants et **doivent être respectés séparément** :

Pour mesurer  $P = 150 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 750 \text{ W}$ , il faut utiliser les calibres

150 V et 5 A et non 75 V et 10 A car le circuit tension serait alors en surcharge.

Le changement de calibre tension est obtenu par des résistances additionnelles.

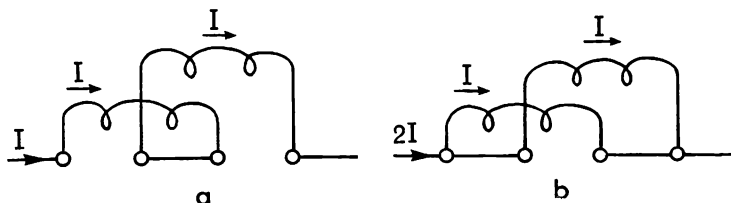


Fig. 294. — Couplage des bobines intensité : a) en série; b) en parallèle.

Le changement de calibre intensité est obtenu par mise en série ou en parallèle des deux demi-bobines intensité (fig. 294).

### 236. Propriétés communes aux appareils.

Ces propriétés concernent tous les ampèremètres, voltmètres et wattmètres.

**1° Cadran.** — L'aiguille se déplace devant des graduations réparties sur une longueur variant généralement de 100 mm à 150 mm. Le nombre de divisions est le plus souvent 100, 120 ou 150.

**2° Chute de tension d'un ampèremètre** (et du circuit intensité d'un wattmètre). — **C'est la tension qui existe entre les bornes quand la déviation est maximale.** Elle doit être la plus petite possible. Elle varie selon les types et la qualité de 0,1 V à 1 V.

**3° Résistance spécifique d'un voltmètre** (et du circuit tension d'un wattmètre). — **C'est l'inverse du courant consommé quand la déviation est maximale.** Elle doit être la plus grande possible.

EXEMPLE : si  $i = 1 \text{ mA}$       $R_s = 1\,000 \, \Omega/\text{V}$

Elle varie selon les types et la qualité de 100  $\Omega/\text{V}$  à 20 000  $\Omega/\text{V}$  et plus.

**4<sup>o</sup> Classe d'un appareil.** — La classe d'un appareil indique en % de la déviation maximale l'erreur que peut atteindre n'importe quelle lecture.

EXEMPLE : 150 divisions — classe 1,5

L'erreur sur une lecture quelconque peut atteindre :

$$1,5 \% \text{ de } 150 = 2,25 \text{ divisions}$$

Si on fait une lecture de 5 divisions, l'erreur relative est peut-être :

$$\frac{2,25}{5} = 0,45 \quad \text{soit} \quad 45 \%$$

Il faut donc éviter d'utiliser un appareil pour des petites déviations (changer le calibre ou l'appareil). La classe doit être la plus petite possible.

On rencontre les classes suivantes :

2,5 — 1,5 : appareils de contrôle;

1 — 0,5 : appareils de précision;

0,2 — 0,1 : appareils étalon.

## NOTIONS D'ÉLECTROSTATIQUE

### 237. Électrisation par frottements.

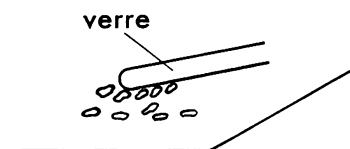


Fig. 295. — Le verre électrisé attire des petits morceaux de papier.

1<sup>o</sup> Frottons un morceau de verre sur une peau de chat ou sur du drap, avec le verre nous pouvons attirer de petits morceaux de papier (fig. 295), le verre s'est électrisé.

Recommençons en tenant le cuivre par l'intermédiaire d'un bâton en verre, il s'électrise (fig. 296).

2<sup>o</sup> Frottons un morceau de cuivre tenu à la main, nous n'obtenons rien.

3<sup>o</sup> Tous les corps peuvent s'électriser par frottement. — Certains conservent les charges là où elles sont apparues, ce sont les isolants.

D'autres laissent les charges se répartir sur toute leur surface, ce sont les conducteurs.

Le corps humain étant relativement bon conducteur, quand on tient le cuivre à la main les charges s'écoulent à travers le corps vers la terre, ce qui explique que l'électrisation ne puisse être mise en évidence.

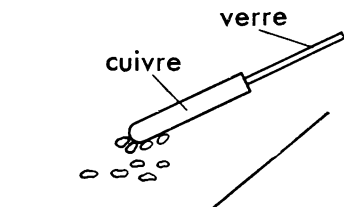


Fig. 296. — Le cuivre doit être tenu par l'intermédiaire d'un « isolant ».

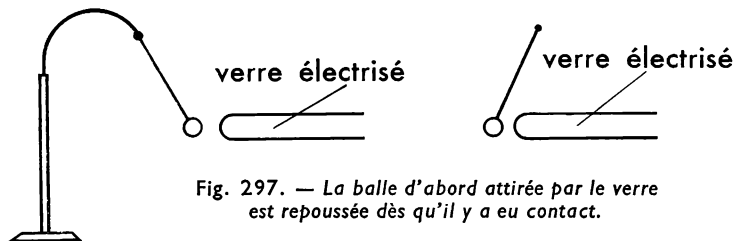


Fig. 297. — La balle d'abord attirée par le verre est repoussée dès qu'il y a eu contact.

4<sup>o</sup> On reconnaît commodément si un corps est électrisé en l'approchant d'un **pendule électrique** (fig. 297) : balle légère en moelle de sureau, suspendue à un support par un fil isolant (en soie). Pour rendre la balle conductrice on l'enduit de mine de plomb écrasée.

### 238. Électrisation par contact.

1° En approchant le verre du pendule on attire la balle (fig. 297). Si le verre touche la balle, celle-ci est vivement repoussée. Le contact a permis aux charges électriques du verre de passer sur la balle, celle-ci est électrisée à son tour.

2° **Existence de deux espèces d'électricité.** — La balle électrisée et repoussée par le verre est attirée si l'on approche d'elle un bâton de résine électrisée (fig. 298). Tout corps électrisé et approché de cette balle se conduirait soit comme le verre, soit comme la résine.

Il y a donc deux espèces d'électricité et deux seulement.

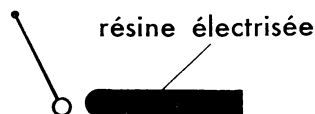


Fig. 298. — La résine attire la balle électrisée par le verre.

3° **Nature des charges.** — L'électricité produite sur le verre est appelée **positive**. L'électricité produite sur la résine est appelée **négative**.

4° Les expériences précédentes nous montrent que :

- **des charges de même signe se repoussent**
- **des charges de noms contraires s'attirent.**

### 239. Électrisation par influence.

1° **Corps neutre.** — Un corps est neutre s'il ne possède pas de charges excédentaires dues à un apport extérieur. N'oublions pas que chacun des atomes qui le constitue possède des charges positives sur le noyau et des charges négatives (électrons). L'ensemble de ces charges se neutralisent.

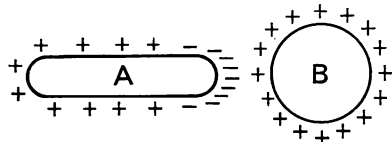


Fig. 299. — Le corps B chargé modifie la distribution des charges de A.

Si le corps est conducteur les électrons peuvent y circuler librement.

2° Approchons d'un corps neutre conducteur A un corps B chargé positivement (fig. 299). Il y a dans le conducteur une migration des électrons vers le corps chargé et le reste du conducteur possède un excédent de charges positives.

Les charges négatives de A étant plus proches de B que les positives, il y aura attraction, c'est ainsi que s'explique l'attraction de la balle de sureau de la figure 297. On dit qu'il y a électrisation par influence.

Si l'on touche le conducteur, les charges positives vont s'écouler vers la terre et les charges négatives retenues par les positives de l'autre corps resteront. Finalement A sera chargé négativement.

#### 240. Loi de Coulomb.

1° Nous connaissons donc l'existence de deux espèces d'électricité, la positive et la négative; nous savons en outre que deux charges de même nom se repoussent alors que deux charges de noms contraires s'attirent. Il nous reste à donner des précisions quantitatives sur les forces développées.

2° **Énoncé de la loi.** — Dans le vide, deux charges électriques ponctuelles <sup>(1)</sup> exercent l'une sur l'autre des forces opposées ayant pour direction la droite qui les joint et dont le module commun est proportionnel au produit des charges et inversement proportionnel au carré de leur distance.

Les forces sont attractives si les charges sont de signes contraires (fig. 300) et répulsives si les charges sont de même signe (fig. 301).

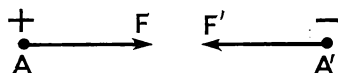


Fig. 300. — Action mutuelle de deux charges de signes contraires.



Fig. 301. — Action mutuelle de deux charges de même signe.

3° **Vérification expérimentale.** — L'impossibilité de réaliser des charges ponctuelles conduit à des résultats très médiocres. Les expériences de Coulomb n'ont plus qu'un intérêt historique. La loi de Coulomb est invérifiable avec exactitude mais elle conduit à des propriétés qui peuvent, elles, être vérifiées et qui, indirectement, vérifient la loi.

4° **Formule provisoire.** — Soient  $q$  et  $q'$  les charges et  $r$  leur distance, la loi peut être traduite par la formule

$$F = k \frac{qq'}{r^2}$$

où  $k$  est un coefficient à déterminer.

(1) C'est-à-dire des charges réduites à un point au sens géométrique du mot.



**5° Valeur de  $k$ .** — Les unités de force (newton) et de longueur (mètre) étant déjà choisies (système S.I.), on peut, dans la formule :

- soit fixer la valeur de  $k$  et en déduire l'unité de charge;
- soit choisir l'unité de charge et en déduire la valeur de  $k$ .

C'est ce dernier choix qui a été retenu, l'unité de charge étant définie par la formule  $Q = It$ , dans laquelle elle découle de l'unité de temps (la seconde) et de l'unité d'intensité de courant (l'ampère) <sup>(1)</sup>; rappelons cette définition :

→ le coulomb (C) est la quantité d'électricité transportée en une seconde par un courant de 1 ampère.

Si l'on pouvait réaliser l'expérience avec deux charges de 1 coulomb distantes de 1 mètre on mesurerait une force de 9 milliards de newtons soit  $9 \times 10^9$  N. On doit donc avoir :

$$9 \times 10^9 = k \frac{1 \times 1}{1^2} \text{ c'est-à-dire } k = 9 \times 10^9$$

et la formule s'écrit :

$$F = 9 \times 10^9 \frac{qq'}{r^2}$$

**6° Rationalisation de la formule.** — Si la formule ci-dessus était adoptée, un facteur  $4\pi$  apparaîtrait dans plusieurs autres formules beaucoup plus usuelles que celle-ci, on a donc préféré *compliquer cette formule et simplifier les autres* en plaçant ici artificiellement un facteur  $4\pi$  au dénominateur et au numérateur

$$F = \frac{9 \times 10^9 \times 4\pi \times qq'}{4\pi \times r^2}$$

posons  $9 \times 10^9 \times 4\pi = \frac{1}{\epsilon_0}$  nous aurons la formule définitive :

$$(44) \quad \boxed{F = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} q \text{ et } q' \text{ en coulombs} \\ r \text{ en mètres} \\ F \text{ en newtons} \end{array} \right.$$

$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$  est la *permittivité du vide* ou *constante électrostatique*.

**7° Charge élémentaire.** — En électrostatique le coulomb est une unité énorme qu'il est d'ailleurs impossible d'accumuler en un espace

(1) La définition de l'ampère fait appel aux lois de l'électromagnétisme (p. 250).

réduit. La plus petite quantité d'électricité existante ou « atome d'électricité » est celle portée par un électron; elle est, en valeur absolue, égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  C et est notée  $e$

$$(45) \quad e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

La charge, négative, d'un électron est  $-e$ . Les noyaux des atomes portent des charges positives dont la plus petite valeur est aussi  $e$ .

Inversement le coulomb vaut

$$1 \text{ C} = \frac{1}{1,6 \times 10^{-19}} = 6,25 \times 10^{18} e$$

**8° Force exercée par plusieurs charges ponctuelles sur une charge ponctuelle.** — C'est la résultante des forces exercées par chacune

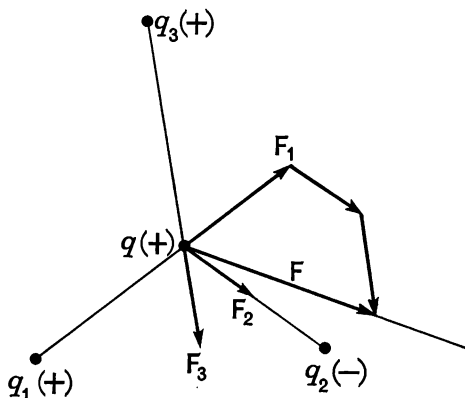


Fig. 302.

d'elles (fig. 302). On la trouve donc en effectuant la somme vectorielle :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

**9° Charges non ponctuelles.** — Le calcul des forces est toujours compliqué et parfois impossible. Un seul cas conduit à un résultat simple : lorsque des charges sont uniformément réparties sur une sphère, la force qu'elles développent sur une charge extérieure à cette sphère est la même que si elles étaient concentrées au centre de la sphère.

### 241. Champ électrique d'une charge ponctuelle.

**1° Définition.** — Considérons l'action d'une charge  $q$  située en un point P sur différentes charges  $q_1, q_2, q_3$  placées successivement en un point M tel que  $PM = r$ . Les forces sont données par la loi de Coulomb et valent respectivement :

$$F_1 = \frac{qq_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad F_2 = \frac{qq_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad F_3 = \frac{qq_3}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Le produit  $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  se retrouve dans les trois calculs, il ne dépend que de la valeur de la charge  $q$  placée en P et de la distance  $PM = r$ ,  
Ce produit est appelé **champ électrique E** développé en M par la charge  $q$ .

$$(46) \quad \boxed{E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} q \text{ en coulombs} \\ r \text{ en mètres} \\ E \text{ en V/m} \end{array} \right.$$

**2° Unité de champ électrique.** — C'est le volt par mètre (V/m); il est évident que le nom de cette unité ne vient pas de la formule 3. Ce nom sera justifié plus tard.

**3° Nouvelle expression de la force électrostatique.** — La force exercée sur une charge  $q'$  placée dans le champ de la charge  $q$  est donnée par la formule 44; en remplaçant dans celle-ci  $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  par E, nous obtenons  $F = q'E$ .

La charge est une grandeur scalaire (algébrique) mais la force est une grandeur vectorielle, le champ est donc aussi une grandeur vectorielle et nous écrirons :

$$(47) \quad \boxed{\vec{F} = q'\vec{E}} \quad \left\{ \begin{array}{l} q' \text{ en coulombs} \\ E \text{ en V/m} \\ F \text{ en newtons} \end{array} \right.$$

**4° Le champ électrique.** — La relation vectorielle  $\vec{F} = q'\vec{E}$  nous montre que le champ et la force sont deux vecteurs colinéaires (de même direction), de plus :

- si  $q' > 0$  force et champ sont de même sens (fig. 303a);
- si  $q' < 0$  force et champ sont de sens contraires (fig. 303b).

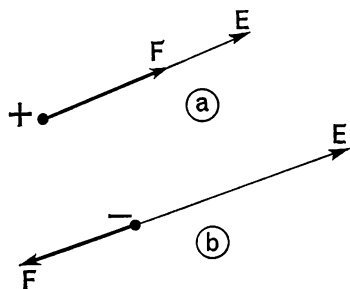


Fig. 303. — La force et le champ sont colinéaires.

La direction et le sens du champ produit en un point  $M$  par une charge  $q$  placée en un point  $P$  sont donc donnés par la direction et le sens de la force développée sur une charge positive  $q'$  placée en  $M$ . En particulier, quel que soit le point  $M$  choisi, la direction du champ passe toujours par  $P$  (fig. 304). Une charge mobile placée en  $M$  décrira toujours une trajectoire rectiligne passant par  $P$  : cette trajectoire est appelée **ligne de champ**. Elle doit être orientée dans le sens du vecteur champ.

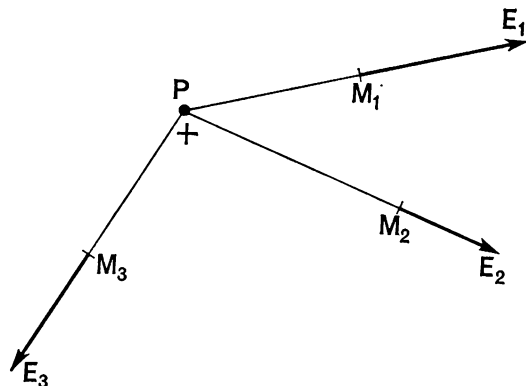


Fig. 304. — La direction du champ passe par  $P$ .

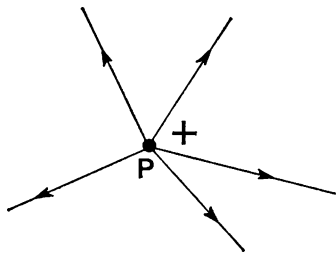


Fig. 305.

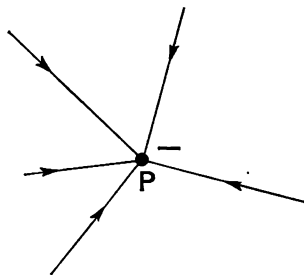


Fig. 306.

**Champ d'une charge positive.** — Les lignes de champ sont radiales et « s'éloignent » de  $P$  (fig. 305).

**Champ d'une charge négative.** — Les lignes de champ sont radiales et « convergent » vers  $P$  (fig. 306).

Notons que le module du champ décroît très vite quand on s'éloigne de la charge (positive ou négative); il est divisé par 4 quand  $r$  double.

**5° Remarque.** — Le mot champ est employé dans deux sens différents :

- au sens quantitatif, c'est le vecteur champ  $\vec{E}$ ;
- au sens qualitatif, c'est l'espace dans lequel la charge exerce son influence (champ d'action).

## 242. Autres champs.

**1° Champ quelconque.** — Les champs électriques produits par des charges non ponctuelles ont des aspects variés; la valeur du vecteur champ en un point est le plus souvent impossible à calculer. Nous donnons quelques définitions se rapportant à n'importe quel champ.

*a) Ligne de champ.* — C'est la courbe décrite par une charge mobile placée dans le champ. En chaque point le vecteur champ donne la direction du déplacement, il est donc tangent à la ligne de champ qui passe par ce point. La ligne est orientée dans le même sens que le vecteur (fig. 307).

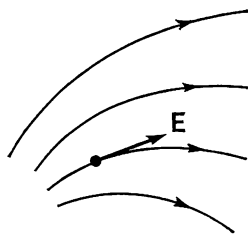


Fig. 307.

*b)* En tout point d'un champ passe une ligne de champ et une seule; en effet s'il y en avait deux en un point donné, une charge placée en ce point pourrait partir dans deux directions différentes ce qui est démenti par l'expérience.

**2° Champ produit par plusieurs charges ponctuelles.** — Rechercher ce champ revient à chercher la résultante des forces développées par chacune des charges sur une charge positive  $q'$ , on a  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$  soit  $q'\vec{E} = q'\vec{E}_1 + q'\vec{E}_2 + q'\vec{E}_3$  et après division par  $q'$  :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

→ le champ résultant est la somme vectorielle des champs partiels.

La figure 308 donne quelques lignes du champ produit par deux charges positives égales et la figure 309, le champ de deux charges opposées.

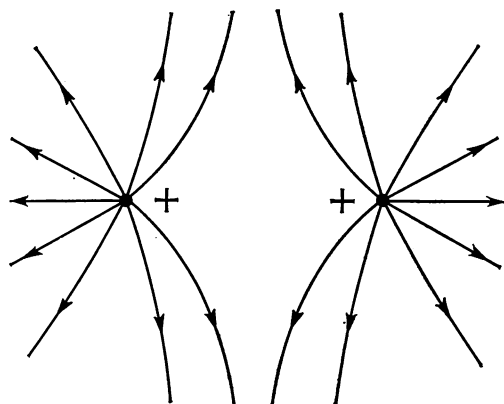


Fig. 308. — Champ de deux charges positives égales.

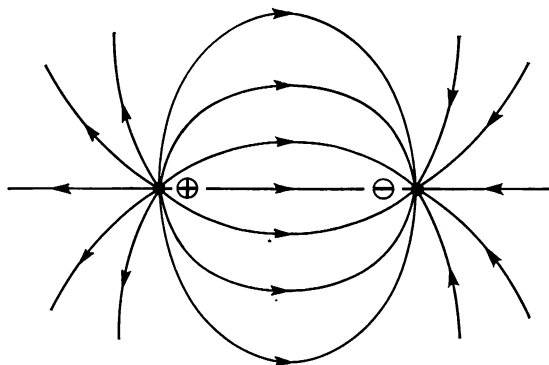


Fig. 309. — Champ de deux charges de signes contraires.

**3° Champ uniforme.** — *a) Définition.* — Un champ électrique est dit uniforme quand ses lignes de champ sont parallèles; le **vecteur champ** a alors même direction, même sens et même module en tout point : il reste équipollent à lui-même (fig. 310).

*b) Réalisation.* — On obtiendra un champ uniforme entre deux plateaux parallèles uniformément chargés, l'un positivement, l'autre négativement (fig. 311). Ces charges seront obtenues en réunissant les deux plateaux aux bornes + et - d'un générateur électrique.

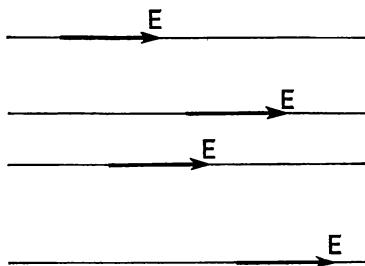


Fig. 310. — Dans un champ uniforme le vecteur  $E$  reste équipollent à lui-même.

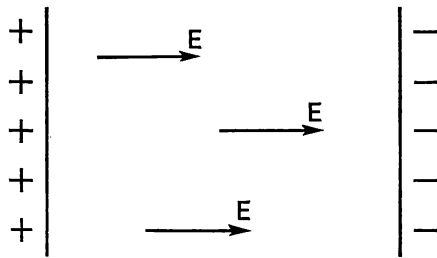


Fig. 311. — Réalisation d'un champ uniforme.

c) Mouvement d'une charge dans un champ uniforme.

1) Si la charge est initialement au repos, elle se déplacera en suivant une ligne de force, la trajectoire sera une droite; la force  $\vec{F} = q\vec{E}$  à laquelle elle est soumise étant constante, l'accélération qui lui sera communiquée sera constante aussi et le mouvement sera rectiligne et uniformément accéléré.

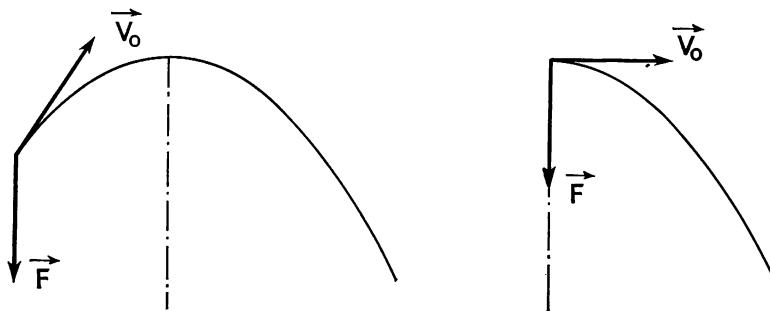


Fig. 312.

2) Si la charge a une vitesse initiale  $\vec{V}_0$  de même direction que  $\vec{E}$ , le mouvement sera uniformément accéléré ou retardé selon que  $\vec{V}_0$  et  $\vec{E}$  seront de même sens ou de sens contraires.

3) Si la charge a une vitesse initiale quelconque le mouvement sera parabolique comme celui d'un corps pesant lancé dans le champ de la pesanteur (fig. 312).

### 243. Travail des forces électriques.

1° **Dans un champ uniforme.** — Considérons une charge ponctuelle positive  $q$  dans un champ uniforme, elle y est soumise à une force  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Proposons-nous de calculer le travail effectué par cette force au cours de divers déplacements.

Soient  $\alpha$  et  $\beta$  deux plans parallèles aux plateaux qui produisent le champ, donc perpendiculaires aux lignes de ce champ, et dont la distance est  $d$  (fig. 313).

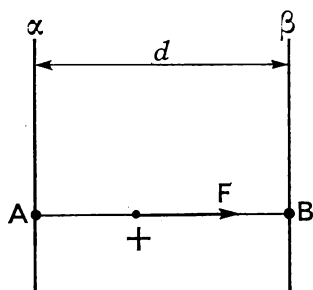


Fig. 313.

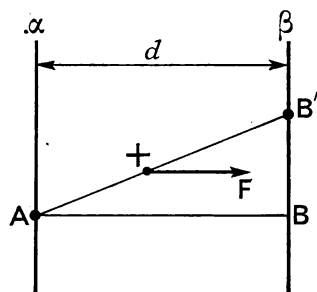


Fig. 314. — Le travail est le même pour les déplacements AB et AB'.

a) *Déplacement suivant une ligne de champ.* — Soient A (du plan  $\alpha$ ) le point de départ et B (du plan  $\beta$ ) le point d'arrivée, le travail produit par la force est :

$$W = Fd = qEd$$

b) *Déplacement oblique par rapport aux lignes de champ* (fig. 314). — Soit  $AB'$  ce déplacement, il peut être décomposé en deux déplacements rectilignes, l'un  $AB$  suivant la ligne de champ et l'autre  $BB'$  perpendiculaire :  $\overline{AB'} = \overline{AB} + \overline{BB'}$ .

Pour  $AB$  le travail est toujours  $W = qEd$  et pour  $BB'$  le travail est nul puisque  $\vec{F} \perp \overline{BB'}$ . Au total le travail est  $W = qEd$  comme dans le cas précédent.

c) *Déplacement quelconque.* — On démontre en mécanique que le travail effectué par une force constante entre deux points  $A'$  et  $B'$  est indépendant du chemin suivi, on peut donc remplacer le parcours curviligne  $\widehat{A'B'}$  par la ligne brisée  $A'ABB'$  (fig. 315) et puisque le travail



est nul aussi bien pour le déplacement  $A'A$  que pour  $BB'$ , le travail pour un déplacement quelconque entre deux points situés l'un sur le plan  $\alpha$  et l'autre sur le plan  $\beta$  est le même que pour le déplacement  $AB$  c'est  $W = qEd$ , il ne dépend pour une charge  $q$  et un champ  $E$  donnés que de la distance  $d$  des deux plans  $\alpha$  et  $\beta$ .

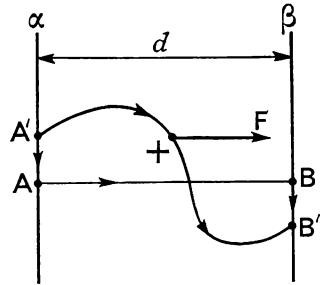


Fig. 315. — Le travail est le même pour les déplacements  $A'B'$  et  $AB$ .

**2° Différence de potentiel.** — a) Définition. — Le produit  $Ed$  du champ électrique par la distance  $d$  est appelé différence de potentiel entre les deux plans  $\alpha$  et  $\beta$ . La différence de potentiel, en abrégé d.d.p. est représentée par la lettre  $U$  :

$$U = Ed$$

b) Nouvelle expression du travail. — Remplaçons  $Ed$  par  $U$  il vient :

$$W = qU$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q \text{ en coulombs} \\ U \text{ en volts} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$$

c) Unité de d.d.p., le volt (V). — Le volt est la d.d.p. qui existe entre deux points d'un champ électrique où une charge de 1 coulomb produit un travail de 1 joule en allant d'un point à l'autre.

d) Unité de champ électrique. — Écrivons la formule  $U = Ed$  sous la forme :

$$(48) \quad E = \frac{U}{d} \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts} \\ d \text{ en mètres} \\ E \text{ en V/m} \end{array} \right.$$

et nous voyons l'origine de l'unité de champ : le volt/mètre (V/m) : le volt par mètre est le champ électrique qui existe entre deux points distants de 1 mètre et dont la d.d.p. est 1 volt (quand le champ est uniforme).

**3° Notion de potentiel.** — Il est souvent commode de parler du potentiel d'un point ou d'un plan. En fait, le potentiel ne peut être défini que par rapport à un autre potentiel pris comme référence. Le plus

souvent ce potentiel de référence est arbitrairement considéré comme nul; il en est ainsi du potentiel de la terre et de celui de la masse dans les montages électroniques.

Si par exemple une batterie de 12 V a son pôle plus à la masse, on dira que le potentiel de son pôle moins est — 12 V.

4° Le travail effectué entre les deux plans  $\alpha$  et  $\beta$  peut s'écrire :

$$W_{\alpha}^{\beta} = q (V_{\alpha} - V_{\beta})$$

où  $V_{\alpha}$  et  $V_{\beta}$  sont respectivement les potentiels du plan de départ et de celui d'arrivée. Chacun de ces plans est une **surface équipotentielle**, c'est-à-dire une surface dont tous les points sont au même potentiel. La d.d.p. est donc constante entre un point quelconque du premier plan et un point quelconque du second. Le travail ne dépend que de la différence des potentiels du point de départ et du point d'arrivée.

5° **Généralisation.** — Si le champ n'est pas uniforme les lignes de champ ne sont plus des droites et les surfaces équipotentielles ne sont plus des plans; le champ entre deux de ces surfaces n'est plus calculable par la formule  $E = \frac{U}{d}$  mais, par contre, le travail est toujours donné par la formule :

$$(49) \quad W_A^B = q (V_A - V_B)$$

où  $V_A$  est le potentiel du point de départ et  $V_B$  celui du point d'arrivée.

*Discussion.* — La formule 6 exprime le travail fourni par une charge; or, le travail fourni par une charge abandonnée à elle-même ne peut être que positif, il en résulte que :

— si  $q > 0$ , le travail sera positif si  $V_A > V_B$  : une charge positive tend à se déplacer dans le sens des potentiels décroissants elle « descend » spontanément les potentiels.

— si  $q < 0$ , le travail sera positif pour  $V_A < V_B$  : une charge négative tend à se déplacer dans le sens des potentiels croissants, elle « remonte » spontanément les potentiels. C'est le cas des électrons, entre deux plateaux chargés, ils vont du négatif vers le positif.

6° **Potentiel créé en un point par une charge ponctuelle.** — On démontre qu'il est donné par la formule :

$$\boxed{V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}} \quad \left\{ \begin{array}{l} q \text{ en coulombs} \\ r \text{ en mètres} \\ V \text{ en volts} \end{array} \right.$$

- cette formule est algébrique,  $V$  est du signe de  $q$ ;
- le potentiel dû à une charge ponctuelle tend vers zéro quand  $r$  tend vers l'infini, on dit que son potentiel est nul à l'infini.

**7° Addition des potentiels.** — Le potentiel créé en un point par plusieurs charges est la somme algébrique des potentiels que chaque charge créerait séparément en ce point :

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Il est donc plus facile d'additionner des potentiels (somme algébrique) que des champs (somme vectorielle).

**8° L'électron-volt.** — Le travail effectué par une charge de 1 électron qui subit une variation de potentiel de 1 volt est appelé électron-volt (eV), ce travail est également :

$W = qU = 1,6 \times 10^{-19} \times 1 = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  on a donc la relation :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

et inversement :

$$1 \text{ J} = 6,25 \times 10^{18} \text{ eV}$$

**9° Remarque.** — Les formules contenant  $\epsilon_0$  conduisent à des calculs plus simples si l'on remplace  $4\pi\epsilon_0$  par sa valeur numérique soit :

$$4\pi\epsilon_0 = 4\pi \times \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = \frac{1}{9 \times 10^9} \quad \text{et l'on obtient :}$$

$$F = \frac{9 \times 10^9 qq'}{r^2} \quad E = \frac{9 \times 10^9 q}{r^2} \quad V = \frac{9 \times 10^9 q}{r}$$

## EXERCICES

**35. 01.** — Calculer la force qui s'exerce entre les deux charges  $q_1$  et  $q_2$  (picocoulombs,  $1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$ ) et préciser si elle est répulsive ou attractive. Réponse pour la 1<sup>re</sup> colonne : attractive,  $9 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ .

|                        |       |      |       |          |       |
|------------------------|-------|------|-------|----------|-------|
| $q_1 \dots \dots$      | + 1   | - 5  | + 100 | - $10^3$ | - 500 |
| $q_2 \dots \dots$      | - 100 | - 12 | + 200 | + 400    | - 50  |
| $r \text{ (mm)} \dots$ | 1     | 0,05 | 20    | 5        | 2,5   |

**35. 02.** — Calculer la force qui s'exerce entre le noyau de l'atome d'hydrogène et son électron; charge commune :  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  distance : 53 picomètres [ $8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$ ].

**35. 03.** — Calculer le champ développé par la charge  $q$  à la distance  $r$  (pour la 1<sup>re</sup> colonne 9 000 V/m).

|                        |   |      |     |        |           |        |
|------------------------|---|------|-----|--------|-----------|--------|
| $q \text{ (pC)} \dots$ | 1 | 100  | 500 | $10^3$ | $10^{12}$ | $10^6$ |
| $r \text{ (mm)} \dots$ | 1 | 0,02 | 0,4 | 0,1    | $10^3$    | 1      |

**35. 04.** — Calculer le champ développé à 53 pm par une charge égale à  $e$  [ $0,5 \cdot 10^{12} \text{ V/m}$ ].

**35. 05.** — Calculer la force qui s'exerce sur une charge de  $10^{-10} \text{ C}$  lorsqu'elle est placée dans un champ de 5 000 V/m [ $5 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ ].

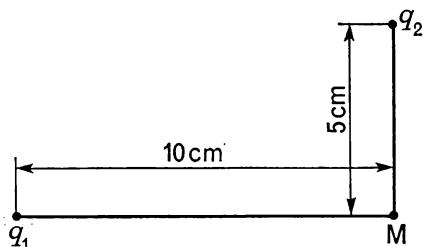


Fig. 316. (L'angle en M est droit)

**35. 06.** — Trois charges égales (et de même signe) sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral, quel est le champ au centre de gravité de ce triangle?

**35. 07.** — Calculer le champ produit en M par les deux charges  $q_1$  et  $q_2$  (fig. 316); préciser sa direction et son sens. Pour la 1<sup>re</sup> colonne

$$E = 185 \text{ V/m.}$$

|                                    |      |      |       |      |
|------------------------------------|------|------|-------|------|
| $q_1 \text{ (pC)} \dots\dots\dots$ | + 50 | + 20 | - 100 | - 10 |
| $q_2 \text{ (pC)} \dots\dots\dots$ | - 50 | + 20 | + 50  | - 5  |

**35. 08.** — Entre deux plans parallèles chargés uniformément et distants de 10 cm la d.d.p. est 500 V. Calculer le champ [5 000 V/m].

**35. 09.** — Quel est le travail accompli par une charge de  $10^{-6} \text{ C}$  allant d'un plan à l'autre? (Suite de l'exercice précédent.)

**35. 10.** — Calculer le potentiel produit par une charge égale à  $e$  en un point situé à 53 pm. [27 V].

**35. 11.** — Trois charges  $q_1$ ,  $q_2$  et  $q_3$  sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral (fig. 317). Sachant qu'une charge de  $+ 10^{-12} \text{ C}$ , placée en un

sommet, produit au centre de gravité G de ce triangle un potentiel de + 50 V  
calculer pour chaque jeu de valeurs le potentiel en G.

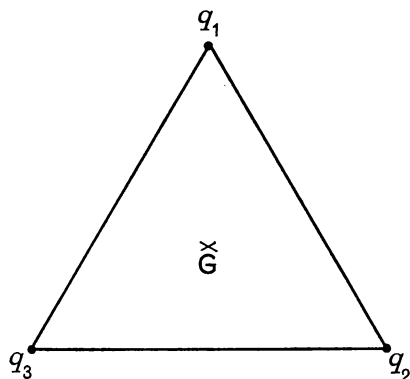


Fig. 317.

|                |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $q_1$ (pC) . . | + 1 | + 1 | + 3 | - 1 | + 5 | + 5 |
| $q_2$ (pC) . . | + 1 | + 1 | + 2 | - 1 | + 4 | - 3 |
| $q_3$ (pC) . . | + 1 | - 1 | + 1 | - 1 | + 3 | - 2 |

## PROBLÈMES

### I. AVEC SOLUTION.

35. 12. — Deux charges  $q_1$  et  $q_2$  de + 100 pC sont placées en des points  $A_1$  et  $A_2$  tels que  $A_1A_2 = 10$  cm (fig. 318). Soient O le milieu de  $A_1A_2$  et P le point de leur médiatrice tel que  $OP = 5$  cm.

1° Calculer le potentiel en O et en P.

2° Déterminer le champ en O et en P.

3° Calculer le travail effectué par une charge de 500 pC allant spontanément de O vers P. Quel est le signe de cette charge?

— SOLUTION —

$$1^\circ \text{ En O : } V_1 = \frac{9 \times 10^9 q_1}{r_1} = \frac{9 \times 10^9 \times 10^{-10}}{0,05} = 18 \text{ V}$$

$$V_2 = V_1 = 18 \text{ V}$$

$$V = V_1 + V_2 = 36 \text{ V}$$

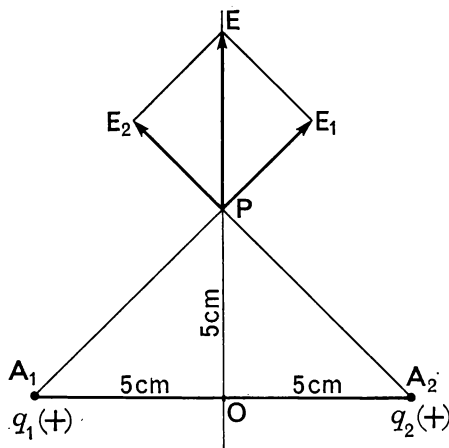


Fig. 318.

$$\text{En P : } V_2 = V_1 = \frac{9 \times 10^9 \times 10^{-10}}{0,05 \sqrt{2}} = 12,7 \text{ V}$$

$$V = V_1 + V_2 = 25,4 \text{ V}$$

2° Champ en O : les deux champs sont opposés, le champ résultant est nul.

Champ en P : les deux champs ont même module :

$$E_1 = E_2 = \frac{9 \times 10^9 q}{r^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 10^{-10}}{(0,05\sqrt{2})^2} = 180 \text{ V/m}$$

le champ résultant est  $E = 180 \sqrt{2} = 255 \text{ V/m}$ .

3° Différence de potentiel :

$$V_O - V_P = 10,6 \text{ V}$$

Travail :  $W = q (V_O - V_P) = 500 \times 10^{-10} \times 10,6 = 53 \times 10^{-10} \text{ J}$ ,  $q$  est positive.

## II. A RÉSOUDRE.

35. 13. — Une charge électrique ponctuelle de 1 microcoulomb est placée en un point O d'un axe Ox. Exprimer le champ électrique et le potentiel en un point M d'abscisse  $x$ .

Calculer en particulier les valeurs correspondants aux abscisses suivantes (en cm).

$$1 - 2 - 5 - 10 - 25 - 100$$

Tracer les courbes  $E = f(x)$  et  $V = g(x)$  pour  $x$  compris entre 0 et 20 cm

**35. 14.** — Deux charges électriques positives  $q = 10$  nanocoulombs sont placées en A et en B à 20 cm l'une de l'autre.

- 1° Calculer la force de répulsion entre les deux charges.
- 2° Déterminer le champ et le potentiel.
  - a) au milieu de M de AB;
  - b) sur AB à 10 cm de B sur le prolongement de AB;
  - c) sur la médiatrice de AB à 5 cm de M.

**35. 15.** — Deux charges électriques de même valeur absolue  $q = 100$  picocoulombs sont placées, la positive en A et la négative en B, à 20 cm l'une de l'autre.

- 1° Calculer la force d'attraction entre les deux charges.
- 2° Déterminer le champ et le potentiel :
  - a) au milieu M de AB;
  - b) sur AB à l'extérieur de AB à 10 cm de la charge positive;
  - c) sur AB à l'extérieur de AB à 10 cm de la charge négative;
  - d) sur la médiatrice de AB à  $10\sqrt{3}$  cm de M.

**35. 16.** — Deux charges électriques  $q_1 = 10$  nanocoulombs et  $q_2 = 40$  nanocoulombs sont placées respectivement en A et en B ( $AB = 30$  cm).

- 1° Calculer le champ et le potentiel en M milieu de AB.
  - 2° Déterminer le point P de AB où le champ est nul.
  - 3° On place sur la médiatrice de AB à 20 cm de M une charge  $q_3 = -20$  nanocoulombs. Quelle est la force exercée sur  $q_3$ ?
-

## CONDENSATEURS

### 244. Notions de condensateur.

**1° Constitution.** — Plaçons une feuille mince (0,1 mm) de papier entre deux plaques d'aluminium, nous avons fabriqué un condensateur (fig. 319).

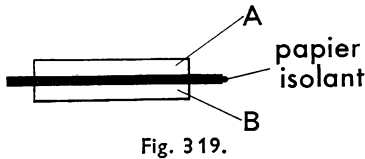


Fig. 319. — Deux plaques d'aluminium séparées par du papier forment un condensateur.



Fig. 320. — Symbole d'un condensateur.



Fig. 320.

Le papier est l'**isolant**; les deux plaques sont les **armatures**.

Un condensateur est constitué par deux conducteurs totalement séparés l'un de l'autre par un isolant (symbole, fig. 320).

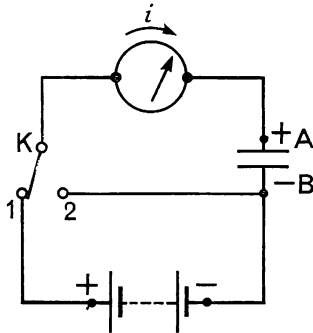


Fig. 321. — Charge d'un condensateur.

le galvanomètre dévie vers la droite. Ainsi, bien que le circuit soit interrompu, des charges électriques ont circulé (fig. 321).

**2° Charge d'un condensateur.** — Réunissons l'armature A au pôle + d'un générateur et l'autre B au pôle — avec un galvanomètre balistique dans le circuit. Le circuit est donc interrompu par l'isolant du condensateur. Fermons K en 1,

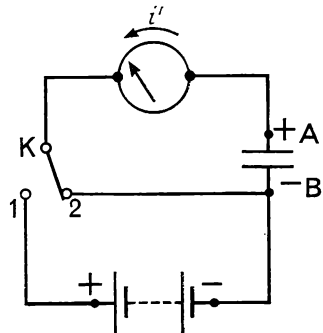


Fig. 322. — Décharge d'un condensateur.

**3° Décharge d'un condensateur.** — Basculons K en 2. Le galvanomètre dévie



à nouveau mais vers la gauche (fig. 322). Le générateur étant hors circuit, le condensateur est la cause de cette déviation.

**4° Interprétation.** — a) Quand on ferme l'interrupteur en 1 les électrons en excès au pôle — du générateur s'écoulent en partie vers l'armature B tandis que le générateur pompe une quantité égale d'électrons sur l'armature A. Il en résulte que :

— Un courant a circulé à travers le circuit.

— Le galvanomètre a été traversé par une quantité d'électricité.

— Une charge — Q est apparue sur B et une charge + Q est apparue sur A. **Le condensateur s'est chargé.**

b) Quand on ferme l'interrupteur en 2, les armatures se trouvent réunies par une chaîne de conducteurs et les électrons en excès sur B s'écoulent vers A jusqu'à neutralisation complète. **Le condensateur s'est déchargé.**

**REMARQUE.** — Il y a donc électrisation des armatures par source d'énergie électrique. Il n'y a aucune différence de nature entre les charges obtenues par ce procédé et celles obtenues au chapitre 35.

## 245. Capacité d'un condensateur.

**1° Influence de la tension de charge.** — Le galvanomètre balistique permet de mesurer la quantité d'électricité qui après avoir traversé le circuit a chargé le condensateur. On vérifie facilement que cette quantité d'électricité est proportionnelle à la tension de charge.

— Q proportionnelle à U —

**2° Influence du condensateur.** — Prenons des condensateurs du commerce, et vérifions que :

— Q reste proportionnelle à U.

— Pour une même tension U, la charge varie avec le condensateur.

**3° Définition.** — On appelle capacité (C) d'un condensateur le rapport constant qui existe entre la quantité d'électricité qu'il accumule et la tension entre ses bornes :

(50)

$$C = \frac{Q}{U}$$

$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ en coulombs} \\ U \text{ en volts} \\ C \text{ en farads} \end{array} \right.$

**4<sup>o</sup> Unité : le farad (F).** — Le farad est la capacité d'un condensateur qui se charge d'un coulomb sous une tension de 1 V.

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}$$

**5<sup>o</sup> Ordres de grandeur.** — Le farad est une unité énorme.

Les condensateurs usuels ont des capacités s'échelonnant de 100 pF (p = pico) à 100  $\mu$ F.

Les capacités s'expriment donc avec les sous-multiples :

$$\mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} \quad \text{nanofarad} = \text{nF} = 10^{-9} \text{ F} \quad \text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

## 246. Calcul de la capacité.

**1<sup>o</sup> Facteurs dont dépend C.** — La capacité d'un condensateur plan est :

- proportionnelle à la surface S des armatures;
- inversement proportionnelle à l'épaisseur  $e$  de l'isolant;
- dépend de la nature de l'isolant;
- ne dépend pas de la nature des armatures.

**2<sup>o</sup> Influence de l'isolant.** — Chaque isolant multiplie la capacité d'un condensateur dont l'isolant serait le vide par un facteur appelé **permittivité relative** ou **constante diélectrique** et noté  $\epsilon_r$ .

$\epsilon_r$  vaut 1 pour le vide et est plus grand que 1 pour les autres isolants. Pour l'air  $\epsilon_r \simeq 1$  (fig. 323).

| SUBSTANCES         | $\epsilon_r$ | E<br>MV/m |
|--------------------|--------------|-----------|
| air . . . . .      | 1            | 3,4       |
| bakélite . . . . . | 6,5          | 10        |
| mica . . . . .     | 8            | 100       |
| papier . . . . .   | 2,5          | 10        |
| verre . . . . .    | 5,5          | 16        |

Fig. 323. — Rappelons 1 MV =  $10^6$  V.

**3<sup>o</sup> Capacité d'un condensateur plan.** — C'est la seule qui ait une expression simple :

$$(51) \quad C = \frac{S \epsilon_r \epsilon_0}{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} S \text{ en m}^2 \\ e \text{ en m} \\ \text{en farads} \end{array} \right.$$

$\epsilon_0$  est la constante électrostatique qui vaut :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^9} \approx 0,885 \cdot 10^{-11}$$

on peut donc écrire :

$$(51 \text{ bis}) \quad \boxed{C = 0,885 \cdot 10^{-11} \frac{S \epsilon_r}{e}}$$

REMARQUE. — a)  $\epsilon_0$  joue un rôle analogue à  $\mu_0$ , on notera que

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{9 \cdot 4 \pi \cdot 10^9}{4 \pi \cdot 10^{-7}} = 9 \cdot 10^{16} = (3 \cdot 10^8)^2$$

or la vitesse de la lumière dans le vide est :

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$$

donc :

$$\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = c^2$$

b) La formule 51 (ou 51 bis) s'applique à tous les condensateurs ayant une faible épaisseur, même s'ils ne sont pas plans.

## 247. Couplage de condensateurs.

1° **Capacité équivalente.** — La capacité équivalente à une batterie de condensateurs est la capacité qui soumise à la même tension que la batterie accumule la même charge totale :

$$C_e = \frac{Q_t}{U}$$

2° **En parallèle** (fig. 324). — La tension de charge est commune :  $U$ .

Les quantités d'électricité sont :

$$Q_1 = C_1 U \quad Q_2 = C_2 U \quad Q_3 = C_3 U$$

La charge totale est :

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 U + C_2 U + C_3 U \\ = U(C_1 + C_2 + C_3)$$

$$\frac{Q_t}{U} = C_1 + C_2 + C_3 = C_e$$

**En parallèle les capacités s'additionnent.**

3° **En série** (fig. 325). — La charge  $Q$  est commune, on a :

$$Q = C_1 U_1 \quad Q = C_2 U_2 \quad Q = C_3 U_3$$

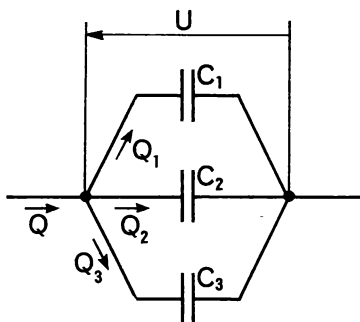


Fig. 324. — Groupement en parallèle de condensateurs.

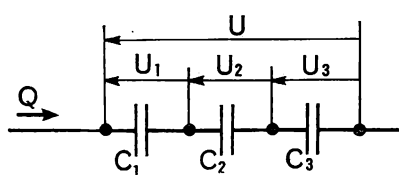


Fig. 325. — Groupement en série de condensateurs.

or la tension totale est

$$U = U_1 + U_2 + U_3 :$$

$$\begin{aligned} U &= \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \\ &= Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) \\ \frac{U}{Q} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{C_e} \end{aligned}$$

L'inverse de la capacité équivalente est égale à la somme des inverses des capacités.

4° **Remarque.** — a) Les lois de groupement de condensateurs sont inversées par rapport à celles des résistances.

b) Pour obtenir une grande capacité équivalente on utilisera le montage en parallèle.

## 248. Énergie emmagasinée.

On démontre que l'énergie emmagasinée par un condensateur est :

$$(52) \quad \boxed{W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} QU} \quad \left\{ \begin{array}{l} C \text{ en farads} \\ Q \text{ en coulombs} \\ U \text{ en volts} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$$

## 249. Champ électrique.

1° **Champ électrique.** — Entre deux plaques chargées il existe un champ électrique. Si les plaques sont parallèles, le champ est uniforme (fig. 326). Une charge positive placée dans le champ suit les lignes de force de celui-ci, une charge négative « remonte » le champ.

Le champ électrique  $E$  entre deux plaques parallèles est égal au quotient de la tension  $U$  entre les deux plaques par la distance  $e$  de celle-ci.

$$E = \frac{U}{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} U \text{ en volts} \\ e \text{ en mètres} \\ E \text{ en V/m} \end{array} \right.$$

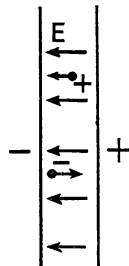


Fig. 326. — Entre les armatures d'un condensateur il y a champ électrique  $E$ .

**2° Champ disruptif  $E_d$ .** — Si l'on fait croître la tension entre les deux plaques le champ augmente jusqu'au moment où un arc s'amorce d'une plaque à l'autre. Si l'isolant est solide il est claqué (hors d'usage).

On appelle **champ disruptif (ou rigidité diélectrique)** d'un isolant la valeur du champ électrique qui produit le claquage de cet isolant. Pour une épaisseur donnée de celui-ci, la tension correspondante  $U_d$  est dite disruptive. On a :

$$U_d = E_d \cdot e$$

Lorsqu'on utilise un condensateur il ne faut évidemment pas dépasser ni même atteindre sa tension disruptive.

On trouvera (fig. 323) quelques champs disruptifs.

## 250. Condensateurs usuels.

**1°** Les principaux isolants utilisés dans la fabrication de condensateurs sont : le mica, le papier, l'air.

On fabrique aussi des condensateurs par voie électrolytique. Ces condensateurs ont des capacités élevées sous un faible volume mais sont polarisés et ne doivent être soumis qu'à des tensions continues de sens convenable.

### **2° Usages des condensateurs.**

- En électronique (radio, télévision...).
- Dans une installation industrielle pour relever le facteur de puissance.

## **PROBLÈMES**

### I. — AVEC SOLUTION.

**36. 01.** — Un condensateur a des armatures de  $10 \text{ dm}^2$  de surface et un isolant de  $0,1 \text{ mm}$  d'épaisseur dont la permittivité relative est  $\epsilon_r = 5$  et le champ disruptif  $10 \text{ MV/m}$ . Calculer :

**1°** La capacité du condensateur.

**2°** La tension maximale à appliquer pour avoir par rapport à la tension disruptive un coefficient de sécurité égal à 5.

## — SOLUTION —

1<sup>o</sup> Capacité

$$C = \varepsilon_0 \frac{S \varepsilon_r}{e} = 0,885 \cdot 10^{-12} \frac{0,1 \cdot 5}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 4,43 \cdot 10^{-8} \text{ F} \\ = 44,3 \text{ nF}$$

2<sup>o</sup> Tension disruptive :

$$U_d = E_d \cdot e = 10 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 1\,000 \text{ V}$$

Tension maximale avec le coefficient de sécurité

$$U_m = \frac{U_d}{5} = \frac{1\,000}{5} = 200 \text{ V}$$

**36. 02.** — Un condensateur de  $2 \mu\text{F}$  est chargé sous une tension de  $350 \text{ V}$ . Calculer la quantité d'électricité et l'énergie emmagasinées.

## — SOLUTION —

Quantité :  $Q = CU = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 350 = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ C}$

Énergie :  $W = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 350 = 0,123 \text{ J}$

**36. 03.** — Deux condensateurs ont même capacité  $4,7 \mu\text{F}$  et supportent la même tension  $500 \text{ V}$ . On les monte successivement en parallèle puis en série et on applique à chaque fois la tension maximale que supporte leur groupement. Calculer pour chacun des deux montages :

1<sup>o</sup> La capacité équivalente.2<sup>o</sup> La tension maximale applicable.3<sup>o</sup> La quantité d'électricité totale emmagasinée.4<sup>o</sup> L'énergie correspondante.

## — SOLUTION —

|                | en parallèle                                                                            | en série                                                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>o</sup> | $C_e = 4,7 + 4,7 = 9,4 \mu\text{F}$                                                     | $\frac{1}{C_e} = \frac{1}{4,7} + \frac{1}{4,7} = \frac{2}{4,7} \quad C_e = 2,35 \mu\text{F}$       |
| 2 <sup>o</sup> | $U_m = 500 \text{ V}$ (tension commune)                                                 | $U_m = 1\,000 \text{ V}$ (somme des tensions)                                                      |
| 3 <sup>o</sup> | $Q_t = C_e U_m = 9,4 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \\ = 4,710^{-3} \text{ C}$                 | $Q_t = C_e U_m = 2,35 \cdot 10^{-6} \cdot 1\,000 \\ = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ C}$                |
| 4 <sup>o</sup> | $W = \frac{1}{2} Q_t U_m = \frac{1}{2} \cdot 4,710^{-3} \cdot 500 \\ = 1,175 \text{ J}$ | $W = \frac{1}{2} Q_t U_m = \frac{1}{2} \cdot 2,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,000 \\ = 1,175 \text{ J}$ |

## II. — AVEC RÉPONSES.

**36. 04.** — Calculer la surface que devrait avoir un condensateur à air ( $\epsilon_r = 1$ ) de 1 mm d'épaisseur pour que sa capacité soit de 1 mF. Quelle tension pourrait-on lui appliquer? ( $E_d = 3,4$  MV/m). Quelle serait l'énergie emmagasinée?

Réponses :      113 000 m<sup>2</sup>;    3 400 V;    5 780 J

**36. 05.** — Calculer la charge et l'énergie d'un condensateur de 50  $\mu$ F chargé sous une tension :

1<sup>o</sup> De 100 V.

2<sup>o</sup> De 500 V.

Réponses du 1<sup>o</sup> :      5.10<sup>-3</sup> C;    0,25 J

## III. — A RÉSOUDRE.

**36. 06.** — On donne 3 paramètres d'un condensateur plan. Calculer le quatrième :

|                           |                    |              |
|---------------------------|--------------------|--------------|
| 1 — S = 1 km <sup>2</sup> | $\epsilon_r = 1,5$ | e = 1 cm     |
| 2 — C = 1 F               | $\epsilon_r = 4$   | e = 1 mm     |
| 3 — S = 1 dm <sup>2</sup> | e = 0,1 mm         | C = 2 000 pF |

**36. 07.** — On possède 5 condensateurs de 2  $\mu$ F pouvant supporter chacun 500 V.

Déterminer les groupements permettant d'obtenir les capacités suivantes :

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10  $\mu$ F.

Quelles sont les tensions maximales à appliquer à chaque groupement?

**36. 08.** — Un condensateur au mica (voir tableau 323) a 1 dm<sup>2</sup> de surface et 0,2 mm d'épaisseur.

1<sup>o</sup> Calculer la capacité du condensateur et la tension maximale à appliquer (sans coefficient de sécurité).

2<sup>o</sup> Calculer la charge et l'énergie emmagasinées pour cette tension.

3<sup>o</sup> On fabrique un condensateur de surface double et d'épaisseur moitié. Calculer la nouvelle tension applicable et l'énergie. Conclusion.

## \* CHARGE ET DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR

### 251. A travers un circuit purement résistant.

1° **Décharge.** — a) Lorsque les bornes d'un condensateur chargé sont réunies à celles d'une résistance, le condensateur se décharge mais pas instantanément; nous nous proposons de préciser l'allure de la courbe  $q = f(t)$  donnant les variations de la quantité d'électricité du condensateur en fonction de la durée de décharge.

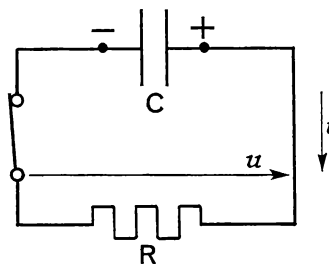


Fig. 327.

b) *Notation.* — Capacité du condensateur **C**; résistance **R**; tension initiale du condensateur **U**; charge initiale **Q = CU**.

Valeurs instantanées : du courant  $i$ ; de la tension du condensateur  $u$ ; de la charge  $q$ ; du temps  $t$ .

c) La décharge produit un courant  $i$  de sens connu (fig. 327), ce courant est engendré par la **diminution** de la quantité d'électricité  $q$  emmagasinée par le condensateur; en choisissant le sens réel du courant comme sens positif nous aurons :

$$i > 0 \quad \text{et} \quad dq < 0 \Rightarrow i = - \frac{dq}{dt}$$

où  $dq$  est la variation de charge pendant le temps  $dt$ . D'autre part  $q$  et  $u$  sont liés par la relation :  $q = Cu$  et la tension  $u$  du condensateur est à chaque instant égale à la tension  $Ri$  de la résistance :

$$u = Ri.$$

En remplaçant dans cette relation  $u$  par  $\frac{q}{C}$  et  $i$  par  $-\frac{dq}{dt}$  il vient :

$$\frac{q}{C} = -R \frac{dq}{dt}$$



Cette équation est dite différentielle et sa résolution sera étudiée dans le cours de mathématiques de la classe BTn. Elle peut s'écrire :

$$\frac{dq}{q} = - \frac{dt}{RC}$$

et sa solution est

$$q = Ke^{-t/RC}$$

où  $K$  est une constante à identifier.

d) A l'instant  $t = 0$  le condensateur n'a pas encore commencé de se décharger et nous avons :  $q = Q = Ke^0 = K$ . La constante  $K$  n'est autre que la charge initiale et la fonction s'écrit :

$$q = Qe^{-t/RC}$$

$\left\{ \begin{array}{l} q \text{ en coulombs} \\ t \text{ en secondes} \\ R \text{ en ohms} \\ C \text{ en farads} \end{array} \right.$

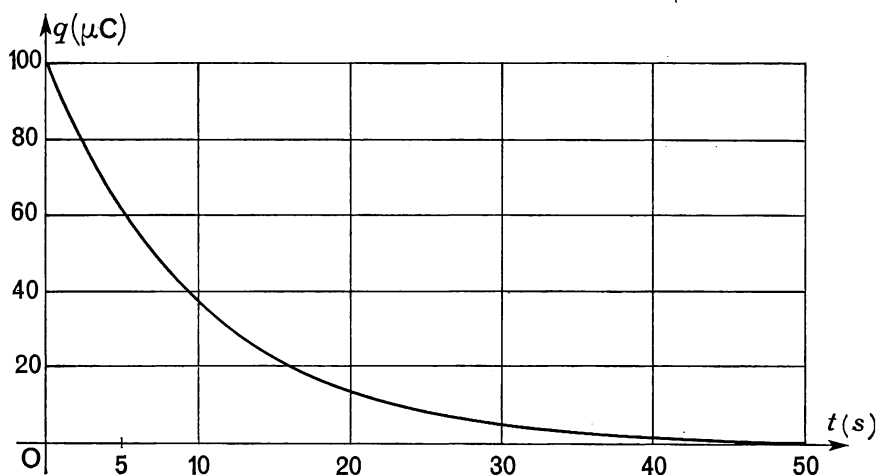


Fig. 328. — Courbe de décharge.

— le nombre  $e$  est la base des logarithmes népériens ou naturels et vaut  $e \simeq 2,718$ .

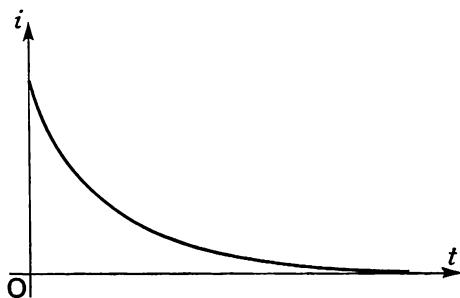
— le produit  $\tau = RC$  est appelé **constante de temps** du circuit, c'est le temps au bout duquel la charge initiale est divisée par  $e$ , en effet si  $t = RC$  on a  $q = Qe^{-1} = \frac{Q}{e}$

La courbe  $q = f(t)$  est donnée figure 328, c'est une **fonction exponentielle** (où la variable est dans l'exposant).

Au bout d'un temps égal à 5 fois la constante de temps,  $t = 5RC$ , la charge restante est  $q = Qe^{-5} = \frac{Q}{e^5}$  dans une table nous lisons  $e^5 = 148$  donc  $q = \frac{Q}{148}$  la charge est alors inférieure à 1 % de la valeur initiale; on peut considérer la décharge comme terminée.

Théoriquement il faut que  $e^{-t/RC} = 0$ , soit  $t = \infty$ , pour que la charge résiduelle soit nulle.

e) *Courant de décharge*:  $i = -\frac{dq}{dt} = \frac{Q}{RC} e^{-t/RC}$  or  $Q = CU$  donc :



$$i = \frac{U}{R} e^{-t/RC}$$

la courbe  $i = f(t)$  a même allure que la courbe  $q$  (fig. 329).

Fig. 329. — *Courant de charge et de décharge.*

f) *Exemples.* — Soient  $C = 10 \mu F$  et  $R = 1 M\Omega$  on a  $RC = \tau = 10$  s, la décharge est pratiquement terminée au bout de 50 secondes.

Avec la même capacité et  $R = 10 \Omega$ , on aurait

$$\tau = 10 \cdot 10^{-6} \times 10 = 100 \mu s.$$

Nous donnons un tableau des valeurs de  $q$  en fonction du temps pour

$$C = 10 \mu F, R = 1 M\Omega \text{ et } Q = 100 \mu C.$$

| $t$ (s)         | 1   | 2    | 5    | 10    | 20    | 30   | 40    | 50    |
|-----------------|-----|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| $t/\tau$        | 0,1 | 0,2  | 0,5  | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     |
| $e^{-t/\tau}$   | 0,9 | 0,82 | 0,61 | 0,368 | 0,135 | 0,05 | 0,018 | 0,007 |
| $q$ ( $\mu C$ ) | 90  | 82   | 61   | 36,8  | 13,5  | 5    | 1,8   | 0,7   |

C'est avec ces valeurs que la courbe 328 a été tracée. Notons que quelles que soient les valeurs de  $R$ ,  $C$  et  $Q$  la courbe a toujours la même forme,  $y = e^{-x}$ .

**2° Charge.** a) La charge n'est pas instantanée, si  $U$  est la tension continue de charge, la valeur de  $q$  à un instant donné est solution de l'équation différentielle :

$$\frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} = U$$

nous la donnons directement :

$$q = Q (1 - e^{-t/RC})$$

La valeur finale de la charge est  $Q$ , elle n'est théoriquement atteinte qu'après un temps infiniment grand; en pratique au bout du temps  $t = 5 RC$  la charge est pratiquement terminée puisque

$$q = Q \left(1 - \frac{1}{148}\right) = 0,993 Q$$

Au bout d'un temps  $t = RC$  on a  $q = Q \left(1 - \frac{1}{e}\right)$  la charge ne diffère de sa valeur finale que de  $\frac{Q}{e}$ .

b) *Courbes.* — Nous précisons celle de la quantité d'électricité (fig. 330); celle de  $i$  est rigoureusement la même qu'à la décharge.

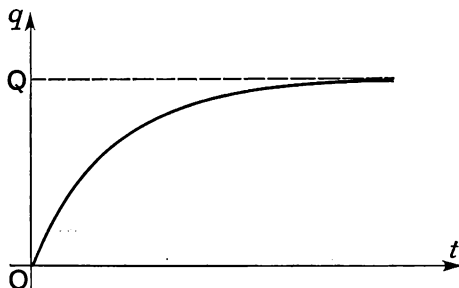


Fig. 330. — Courbe de charge.

*Tableau des valeurs:* Pour  $C = 10 \mu F$ ,  $R = 1 M\Omega$  et  $U = 10 V$  soit  $Q = 100 \mu C$ .

| $t$ (s)         | 1  | 2  | 5  | 10   | 20   | 30 | 40   | 50   |
|-----------------|----|----|----|------|------|----|------|------|
| $Q$ ( $\mu C$ ) | 10 | 18 | 39 | 63,2 | 86,5 | 95 | 98,2 | 99,3 |

## 252. A travers un circuit résistif et inductif.

1° **Décharge.** — a) Les notations sont les mêmes qu'au paragraphe 1. La valeur de l'inductance est notée  $L$  (fig. 331).

b) **Équation de décharge.** — Nous la donnons pour la quantité d'électricité :

$$\frac{q}{C} + R \frac{dq}{dt} + L \frac{d^2q}{dt^2} = 0$$

c) **Solution.** — Elle dépend du signe de la quantité

$$R^2 - 4 \frac{L}{C}.$$

*Premier cas :*

$$R^2 - 4 \frac{L}{C} > 0 \text{ soit}$$

$$R > 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

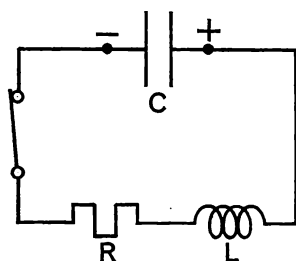


Fig. 331.

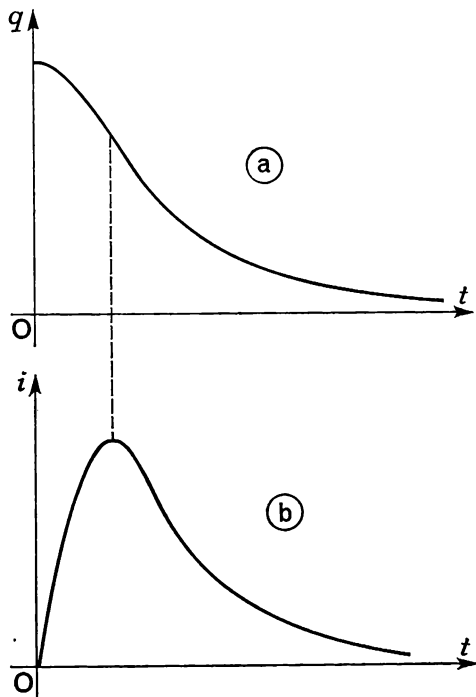


Fig. 332. — Décharge apériodique.

le circuit est **très amorti**, la décharge est **apériodique**, la quantité d'électricité du condensateur décroît constamment (fig. 332a) et finit par s'annuler; le courant, nul à l'instant  $t = 0$  de la fermeture de l'interrupteur, commence par croître, passe un maximum puis tend vers zéro (fig. 332b).

$$\text{Deuxième cas : } R^2 - 4 \frac{L}{C} = 0 \text{ soit } R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

l'amortissement du circuit est dit critique, la décharge est apériodique et les courbes ont même allure qu'au premier cas.

*Troisième cas :*  $R^2 - 4\frac{L}{C} < 0$  soit  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$

l'amortissement du circuit est faible et la décharge est oscillante. La charge du condensateur décroît, s'annule puis change de signe et ainsi de suite (fig. 333) mais, la valeur maximale atteinte au cours d'une **pseudo-période** diminue peu à peu et finit par s'annuler. La durée d'une pseudo-période  $T$  est légèrement supérieure à  $2\pi\sqrt{LC}$ .

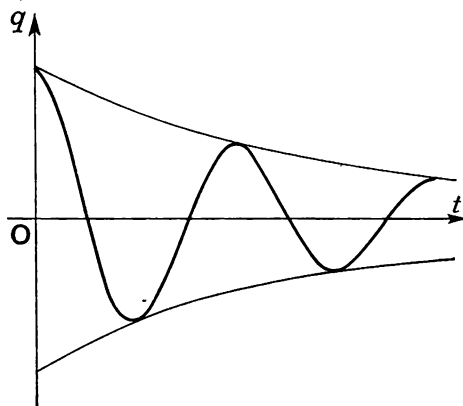


Fig. 333. — Décharge oscillante.

d) *Cas limite.* — Si la résistance  $R$  est nulle, l'équation se réduit à  $\frac{q}{C} + L\frac{d^2q}{dt^2} = 0$  dont la solution est une fonction sinusoïdale du temps. Le courant est également sinusoïdal, il peut circuler indéfiniment.

2° **Charge.** — a) *Équation :*  $\frac{q}{C} + R\frac{dq}{dt} + L\frac{d^2q}{dt^2} = U$ ;  $U$  étant la tension de charge. La solution de cette équation dépend encore du signe de  $R^2 - 4\frac{L}{C}$ .

*Premier et deuxième cas :*  $R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  la charge est apériodique, initialement nulle, la quantité d'électricité  $q$  croît jusqu'à la valeur  $Q = CU$  qui n'est théoriquement atteinte qu'au bout d'un temps infini.

*Troisième cas :*  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  la charge est oscillante, la quantité

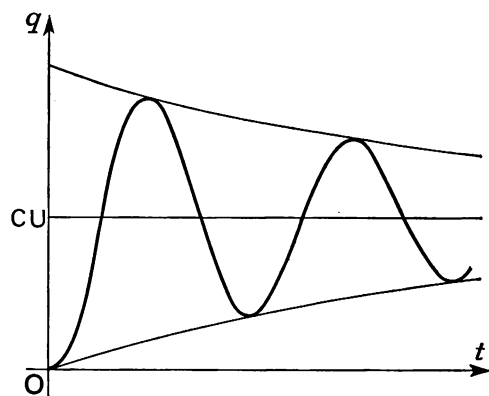


Fig. 334. — Charge oscillante.

d'électricité est d'abord croissante, elle dépasse la valeur  $Q = CU$  puis décroît et oscille autour de cette valeur qui sera la charge finale (fig. 334).

\_\_\_\_\_

## LE COURANT ÉLECTRIQUE ET LE CORPS HUMAIN

### 253. Dangers de l'Électricité.

Les journaux relatent quelquefois des accidents, mortels ou non, qui sont causés par l'électricité. Sauf de rares cas où les accidents sont fortuits, ils sont dus soit à une imprudence, soit à une installation défectueuse.

### 254. Résistance électrique du corps humain.

Elle n'est pas, comme celle des appareils, de valeur constante et bien définie.

Elle peut atteindre plus de 100 000  $\Omega$  dans certains cas mais peut aussi descendre jusqu'à 1 000  $\Omega$  environ dans le cas le plus défavorable. Nous donnons ci-dessous un tableau précisant les circonstances qui tendent à diminuer ou à augmenter le danger électrique.

| Le danger<br>diminue avec                                      | Le danger<br>augmente avec                                              |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Les mains sèches                                               | Les mains humides                                                       |
| Les mains calleuses                                            | Les mains lisses                                                        |
| L'indifférence au courant                                      | La crainte du courant                                                   |
| Le contact volontaire                                          | L'effet de surprise                                                     |
| La bonne santé                                                 | La mauvaise santé, la fatigue                                           |
| Le trajet du courant hors des<br>organes vitaux (bras, jambes) | Le trajet à travers les organes<br>vitaux (cœur, poumons, cer-<br>veau) |
| Le mauvais contact (du bout des<br>doigts)                     | Le bon contact (à pleine main)                                          |
| Le bon isolement par rapport au<br>sol (chaussures sur tapis)  | Le mauvais isolement (pieds nus<br>sur la terre)                        |

### 255. Effets du courant.

1° Brûlures.

2° Destruction des cellules par électrolyse.

3° Accidents nerveux : paralysie des organes (cœur, poumons).

Noter que les courants alternatifs haute fréquence ne sont pas dangereux. (Ils sont même utilisés en thérapeutique.)

### 256. Intensités et tensions dangereuses.

L'intensité à partir de laquelle il y a danger est **0,05 A** en continu et en alternatif (dans ce dernier cas 0,05 est la valeur efficace).

Compte tenu de la valeur de la résistance dans les conditions les plus défavorables soit  $1\,000\ \Omega$ , la tension dangereuse est :

$$U = RI = 0,05 \times 1\,000 = 50\text{ V}$$

$U = 50\text{ V}$

Les installations pour lesquelles la tension ne dépasse pas **50 V** sont classées « très basse tension » (TBT) et aucune prescription de sécurité ne leur est imposée si elles sont totalement indépendantes des autres installations <sup>(1)</sup>.

### 257. Contacts dangereux.

1° On touche accidentellement deux points entre lesquels existent une différence de potentiel : le corps est soumis à la tension existante. On dit que le contact est bipolaire.

2° On touche un seul fil (ou un seul point) et un autre point du corps touche le sol conducteur : le corps est soumis à la tension existant entre le fil et le sol. On dit que le contact est monopolaire.

3° On touche une masse métallique qui elle-même est en contact avec un fil par suite d'un défaut d'isolement entre ce fil et la masse. Tout se passe comme si on touchait directement le fil.

---

(1) Décret n° 62-1454 du 14 novembre 1962 (Brochure n° 62-237 éditée par le J. O., 26, rue Desaix, Paris-15°).



### 258. Mesures de sécurité.

- 1° Ne jamais toucher **même un seul fil** sous tension.
- 2° Manœuvrer les appareils de coupure haute tension avec une **perche isolante**, des gants en caoutchouc et debout sur un socle isolant.
- 3° **Mettre les masses métalliques à la terre** : réfrigérateur, machine à laver, moteur, etc.
- 4° Partout où le danger est particulièrement présent : cave, salle de bains, écuries, tous lieux humides, installer des interrupteurs à **capot isolant** ou mieux utiliser une alimentation sous tension de sécurité au plus égale à 50 V.
- 5° Ne jamais toucher un interrupteur avec des mains humides.
- 6° Ne manœuvrer un interrupteur qu'après s'être assuré que personne ne travaille sur le circuit correspondant.
- 7° Ne jamais jouer avec le courant électrique. Les " blagues " qui consistent à appliquer une tension à un camarade pour connaître ses réactions en tant que récepteur sont **criminelles** et doivent être totalement exclues.

### 259. Secours aux électrocutés.

- 1° **Couper le courant** si possible, sinon dégager le corps avec des gants et en s'isolant du sol.
- 2° **Avertir docteur et pompiers.**
- 3° **Pratiquer sur l'électrocuté la respiration artificielle** : méthode Schaeffer ou mieux, car elle ne demande aucun entraînement, méthode du bouche à bouche.
- 4° **Méthode dite du « bouche à bouche »** : *Appliquer directement, ou avec interposition d'un mouchoir, sa bouche sur celle de l'électrocuté et respirer profondément et lentement en insufflant sa propre expiration dans les poumons du patient.*

Cette méthode est également valable pour les noyés. Un électrocuté, ou un noyé, peut nécessiter une respiration artificielle de plusieurs heures avant de retrouver sa respiration naturelle.

## \* FORCES ÉLECTROMOTRICES DE CONTACT

### 260. Effet peltier.

**1<sup>o</sup> Expérience.** — Une barre de fer de grosse section est placée entre deux barres de cuivre; les contacts doivent être excellents pour que la résistance soit très faible; les barres peuvent, par exemple, être vissées l'une dans l'autre (fig. 335). Les deux contacts fer-cuivre sont plongés dans deux récipients contenant un mélange d'eau et de glace donc ayant une température de 0 °C (fig. 336).

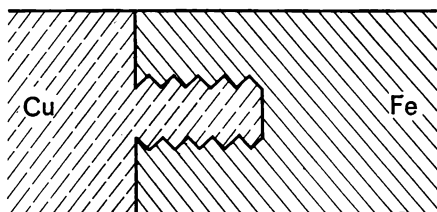


Fig. 335.

Si l'on fait passer un courant dans le sens indiqué, on constate :

a) *Que la glace du récipient 1 fond*: le système étudie apporte de la chaleur au récipient 1.

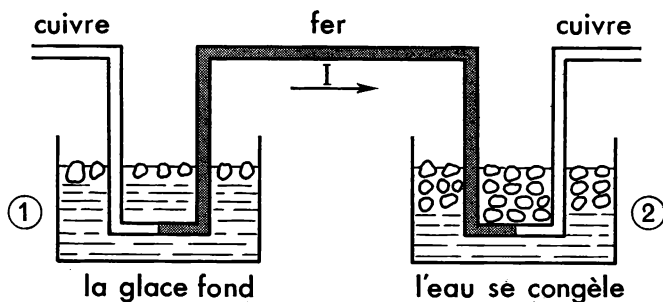


Fig. 336.

b) *Que l'eau du récipient 2 se congèle*: le système prélève de la chaleur dans le récipient 2.

Ce que nous savons de l'effet joule nous conduisait à penser que les

deux récipients s'échaufferaient et que la glace y fondrait. Puisqu'il n'en est rien dans le récipient 2 c'est qu'à l'effet joule se superpose un autre phénomène : l'effet peltier.

**2° Force électromotrice de contact entre deux métaux de même température.** — Les électrons de deux métaux différents n'ont

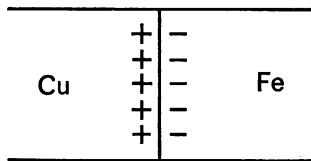


Fig. 337.

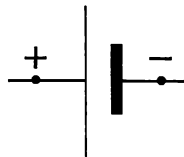


Fig. 338.

pas la même mobilité, lorsqu'un contact intime est établi, les électrons les plus mobiles diffusent de leur métal dans l'autre, sous l'effet d'un champ électromoteur; cette diffusion s'arrête d'elle-même quand le champ électrostatique dû à la nouvelle distribution des charges est égal au champ électromoteur (fig. 337).

Le contact entre deux métaux est équivalent à une pile de force

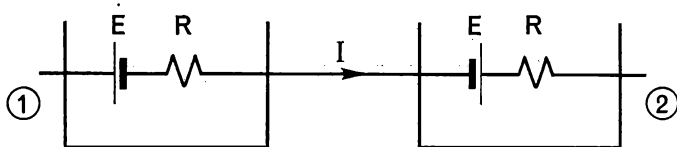


Fig. 339.

électromotrice  $E$  appelée **f.é.m. de Peltier** (fig. 338). Selon le sens de courant imposé par la source extérieure cette f.é.m.  $E$  facilitera le passage du courant ou s'y opposera (elle se conduira alors comme une force contre-électromotrice). La figure 336 peut être remplacée par un schéma équivalent (fig. 339).

**3° Justification des résultats de l'expérience.** — Dans le récipient n° 1 le courant électrique doit vaincre la résistance de contact et la f.é.m. de Peltier  $E$ , il fournit donc au récipient l'énergie totale :

$$W_1 = RI^2t + EI t$$

Dans le récipient n° 2, le passage du courant est facilité par  $E$  et l'énergie qu'il fournit est la différence entre l'effet joule et l'effet peltier :

$$W_2 = RI^2t - EIt$$

cette énergie est négative dans l'expérience décrite c'est donc en fait le récipient qui fournit de l'énergie au système. Pour qu'il en soit bien ainsi il faut  $RI^2t < EIt$  soit  $R < \frac{E}{I}$  c'est la raison pour laquelle la résistance de contact doit être très faible. Si l'on avait  $R > \frac{E}{I}$  le récipient 2 s'échaufferait aussi mais moins que le n° 1.

**4° Calcul de  $E$ .** — La mesure des énergies  $W_1$  et  $W_2$  permet le calcul :  $W_1 - W_2 = RI^2t + EIt - (RI^2t - EIt) = 2EIt$

$$E = \frac{W_1 - W_2}{2It}$$

**5° Quelques valeurs de  $E$ .** — Les f.é.m. de Peltier sont très faibles, à 0 °C on obtient, le premier métal cité étant positif :

cuivre-fer : 3 mV;  
zinc-cuivre : 3 mV;  
cuivre-bismuth : 21 mV.

**6° Loi de Volta.** — La force électromotrice d'une chaîne de métaux homogènes et à même température est identique à celle qui existerait

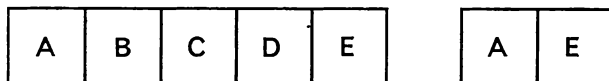


Fig. 340. — Les deux systèmes donnent la même force électromotrice de Peltier.

si les deux métaux extrêmes étaient directement en contact (fig. 340); soient 5 métaux A, B, C, D, E on peut écrire :

$$(V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D) + (V_D - V_E) = V_A - V_E$$

**CONSÉQUENCES.** — *a)* Dans une chaîne métallique on peut insérer des métaux intermédiaires sans changer la f.é.m.

*b)* Si les métaux extrêmes sont de même nature la f.é.m. est nulle.

*c)* Si l'on réalise une chaîne fermée la f.é.m. totale est nulle et aucun courant ne circule dans la chaîne.

d) Il est impossible de mesurer la f.é.m. de Peltier avec un voltmètre puisque le voltmètre ferme la chaîne; les mesures classiques ne sont donc pas perturbées par l'effet peltier.

e) On peut souder les contacts sans changer la f.é.m. résultante.

## 261. *Effet thomson.*

1° **Définition.** — Dans une barre d'un même métal une force électromotrice, dite de Thomson, apparaît si les extrémités de cette barre sont à des températures différentes.

Tout se passe comme si les extrémités étaient de natures différentes et l'effet thomson peut être considéré comme un cas particulier de l'effet peltier.

2° **Comportement des métaux traversés par un courant.** — Pour une première catégorie l'effet est « positif » (cuivre, zinc...) : le métal se refroidit quand le courant circule dans le sens des températures croissantes (fig. 341) et se réchauffe dans le cas contraire. Pour une deuxième catégorie l'effet est « négatif » (fer, aluminium...) le métal se réchauffe quand le courant circule dans le sens des températures croissantes et se refroidit dans le cas contraire.

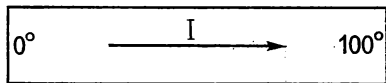


Fig. 341. — Le cuivre se refroidit.

3° **Valeurs des f.é.m. de Thomson.** — Elles sont encore plus faibles que celles de Peltier, on a :

+  $2\mu\text{V}$  par degré pour le cuivre et  $-10\mu\text{V}$  par degré pour le fer; la f.é.m. est à peu près nulle pour le plomb.

## 262. *Force électromotrice thermoélectrique.*

1° **Existence.** — Soient deux métaux différents A et B dont les contacts  $C_1$  et  $C_2$  sont à des températures différentes (fig. 342), les deux f.é.m. de contact sont différentes, leur somme algébrique n'est pas nulle et un courant circule dans la chaîne.

2° **Mesure de la f.é.m.** — On réalise une chaîne comportant un fil de métal A entre deux fils de métal B (fig. 343), le premier contact est

plongé dans un récipient appelé source froide et le second porté à une température plus grande par une source chaude. Les contacts appelés « soudures » peuvent être obtenus en tortillant les fils ou en les soudant. Le millivoltmètre mesure  $E$ .

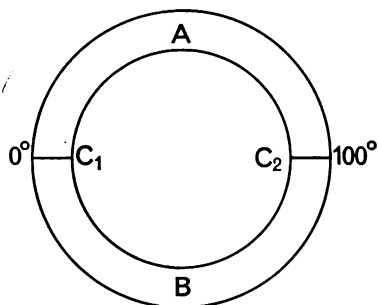


Fig. 342. — Les deux f.é.m. de contact sont différentes.

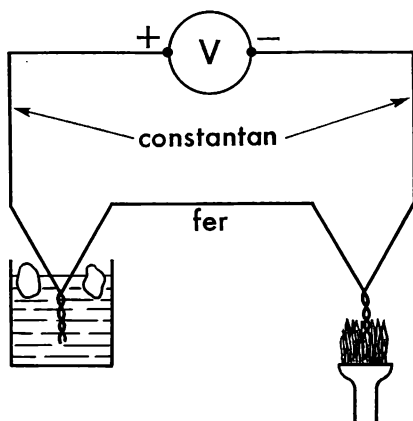


Fig. 343.

On ne peut obtenir de f.é.m. que si le fil du milieu est de nature différente des deux extrêmes et les deux soudures à des températures différentes donc si l'on combine l'effet peltier et l'effet thomson.

La chaîne est appelée couple **thermoélectrique**.

**3° Expression de la f.é.m.** — Si  $t$  est la différence de température entre les deux sources, la f.é.m. est une fonction de la forme :

$$E = at + bt^2$$

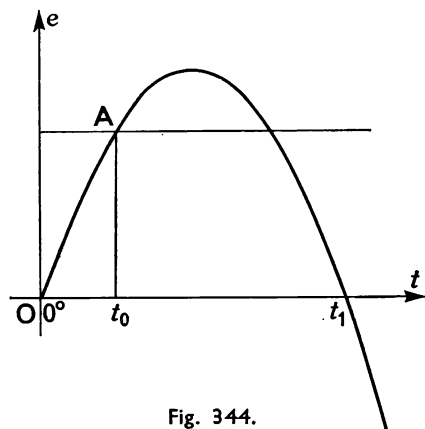


Fig. 344.

La courbe  $E = f(t)$  est donc une parabole.

Si l'on maintient la source froide à  $0^\circ\text{C}$  par exemple et que l'on fait varier la température de la source chaude on peut tracer la courbe (fig. 344). La f.é.m. s'annule pour une valeur  $t_1$  de la température et ensuite s'inverse pour  $t > t_1$ .

Si la source froide est à une température  $t_0$  la courbe est la

même mais les ordonnées doivent être comptées à partir du point correspondant à  $t_0$  (translation de l'axe des  $t$ ).

**4° Origine de l'énergie mise en jeu.** — L'énergie provient des sources : la source chaude en fournit, la source froide en reçoit et la différence est transformée en énergie électrique.

**5° Valeur de la f.é.m.** — Les f.é.m. sont données pour un métal en contact avec le plomb parce que ce dernier ne présente pratiquement pas d'effet thomson; la f.é.m. entre deux métaux quelconques sera :

$$V_A - V_B = (V_A - V_{Pb}) - (V_B - V_{Pb})$$

cette différence est algébrique.

**6° Tableau des f.é.m. métal-plomb.** — La source froide est à 0 °C et la chaude à 100 °C. Si  $E$  est positive le courant va du métal vers le plomb à travers la soudure froide et du plomb vers le métal dans la soudure chaude (c'est l'inverse pour  $E$  négative).

| MÉTAUX               | E EN $\mu V$ |
|----------------------|--------------|
| Argent. . . . .      | + 330        |
| Antimoine . . . . .  | + 4 280      |
| Bismuth . . . . .    | — 7 600      |
| Constantan . . . . . | — 3 870      |
| Cuivre . . . . .     | + 315        |
| Fer . . . . .        | + 1 430      |
| Platine . . . . .    | — 440        |

**7° Usages des couples thermoélectriques.** — a) *Mesure des températures.* — Les couples étalonnés avec des températures connues permettent la mesure précise des autres températures :

Jusqu'à 600 °C on utilise les couples cuivre-constantan et fer-constantan.

De 600 °C à 1 100 °C on utilise le couple chromel (90 % de nickel et 10 % de chrome) et alumel (95 % de nickel et 5 % d'aluminium).

De 1 100 °C à 1 500 °C on utilise le couple platine-platine rhodié (90 % de platine et 10 % de rhodium).

L'appareil de mesure est directement gradué en degrés.

b) *Piles thermoélectriques.* — En associant en série un grand nombre de couples on peut obtenir des f.é.m. élevées mais le rendement de tels générateurs ne dépasse pas 0,5 p. 100.

---

## EXERCICES

---

1. — La soudure froide étant à 0 °C et la chaude à 100 °C calculer les f.é.m. des couples suivants :

1° Fer-constantan [réponse 5,3 mV].

2° Cuivre-constantan.

3° Antimoine-bismuth.

2. — La force électromotrice d'un couple thermo-électrique est en microvolts exprimée par la formule :

$$e = 60t - 0,05 t^2$$

où la température de la soudure froide est 0 °C et celle de la soudure chaude  $t$  °C.

1° Calculer la f.é.m. pour les valeurs suivantes de  $t$ :

$$100 - 300 - 500$$

2° Pour quelle valeur de  $t$  cette f.é.m. est-elle maximale?

3° Calculer la température du point d'inversion.

4° Quelle serait en fonction de  $t$  (température de la soudure chaude) la formule donnant la f.é.m.  $e_1$  pour une soudure froide à 100 °C?

---



## APPENDICE I

### 1. Force (F).

1° **Notion.** — On appelle force toute cause capable de modifier l'état d'un corps, soit dans sa forme, soit dans son mouvement.

**EXEMPLES.** — On peut déformer un ressort en lui accrochant un corps pesant : le poids d'un corps est une force.

On peut mettre en mouvement un wagonnet en le poussant : l'homme peut développer une force grâce à ses muscles.

2° **Éléments d'une force.** — a) *Point d'application.* — Point où la force est appliquée.

b) *Direction.* — Droite suivant laquelle la force s'exerce.

c) *Sens.* — Pour une direction donnée il y a deux sens possibles.

d) *Intensité.* — Permet de comparer les forces entre elles, elle est la **mesure** de la force.

**EXEMPLE.** — Le poids d'un corps est appliqué au centre de gravité du corps, sa direction est verticale, il est orienté de haut en bas, son intensité est proportionnelle à la masse du corps.

3° **Mesure des forces.** — Elle s'effectue à l'aide d'un dynamomètre (voir cours de mécanique).

4° **Unité de force.** — L'unité légale est le **newton (N)**. On en trouvera la définition en mécanique. Précisons seulement que le kilogramme a un poids de 9,8 N environ.

5° Il est commode de représenter une force par un vecteur qui donne immédiatement tous les éléments de la force (fig. 345).

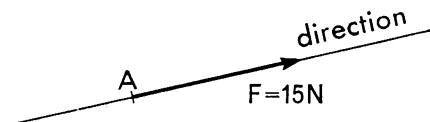


Fig. 345.

## 2. Travail (W).

1° **Notion.** — Une force produit du travail quand elle déplace son point d'application.

2° **Calcul.** — *Dans le cas où le déplacement de la force se fait dans sa propre direction le travail est égal au produit de l'intensité de la force par la longueur du déplacement :*

travail = force  $\times$  déplacement

$$\boxed{W = F \cdot l}$$

$\left\{ \begin{array}{l} F \text{ en newtons} \\ l \text{ en mètres} \\ W \text{ en joules} \end{array} \right.$

3° **Unité.** — L'unité de travail est le **joule (J)** c'est le travail effectué par une force de 1 N qui déplace dans sa direction son point d'application de 1 m :

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

### 3° Exercices :

1° On soulève à l'aide d'un palan une charge de 50 kg à une hauteur de 8 m. Calculer le travail effectué.

— SOLUTION —

Poids de la charge :

$$P = 9,8 \times 50 = 490 \text{ N}$$

Force à développer :

$$F = P = 490 \text{ N}$$

Travail effectué :

$$W = F \times l = 490 \times 8 = 3\,920 \text{ J}$$

2° Une chute d'eau a une hauteur de 60 m. Calculer le travail fourni par chaque mètre cube d'eau de la chute.

— SOLUTION —

Poids de l'eau :

$$1 \text{ m}^3 \text{ a une masse de } 1\,000 \text{ kg}$$

et un poids :

$$P = 9,8 \times 1\,000 = 9\,800 \text{ N}$$

Travail :

$$W = F \times l = 9\,800 \times 60 = 588.10^3 \text{ J}$$

## APPENDICE II

### 1. Chaleur massique (ou spécifique) d'un corps.

1° **Définition.** — La chaleur massique d'un corps est la quantité de chaleur (ou l'énergie) qu'il faut fournir à 1 kg de ce corps pour élever sa température de 1 degré Celsius (1°C) sans modifier son état.

2° **Unité.** — La chaleur massique s'exprimait autrefois en calories par kilogramme, aujourd'hui on doit l'exprimer en **joules par kilogramme (J/°C.kg)**.

3° Quelques chaleurs massiques :

|                |               |                   |             |
|----------------|---------------|-------------------|-------------|
| Eau . . . .    | 4 180 J/°C.kg | Aluminium . . . . | 888 J/°C.kg |
| Cuivre . . . . | 388 J/°C.kg   | Air . . . . .     | 990 J/°C.kg |

### 2. Quantité de chaleur fournie à un corps.

1° La quantité de chaleur qu'il faut fournir à un corps pour élever sa température est égale au produit de sa *masse* ( $m$ ) par sa *chaleur massique* ( $c$ ) par l'*élévation de température* qu'il subit :

Soit  $T_0$  sa température initiale et  $T_1$  sa température finale, l'élévation de température est  $T_1 - T_0$  et la quantité de chaleur fournie (ou l'énergie) est :

$$\boxed{W = m \times c (T_1 - T_0)} \quad \left\{ \begin{array}{l} m \text{ en kilogrammes} \\ c \text{ en J/°C.kg} \\ T_1 \text{ et } T_0 \text{ en degrés} \end{array} \right.$$

2° La formule précédente peut s'écrire :

$$T_1 - T_0 = \frac{W}{mc}$$

3° **Exercices :**

1° Calculer l'élévation de la température de 1 litre d'eau quand on lui fournit une quantité de chaleur de 1 kJ.

## — SOLUTION —

La masse de 1 l d'eau est 1 kg.

La chaleur massique de l'eau est 4 180 J/°C.kg  
d'où l'élévation de température :

$$T_1 - T_0 = \frac{1\,000}{1 \times 4\,180} = 0,24^\circ\text{C}$$

2° Combien de litres d'eau prise à 15°C peut-on porter à ébullition (100°C) avec 1 kg de charbon fournissant 7,5 th.

N. B. — 1 th = 4,18.10<sup>6</sup> J.

## — SOLUTION —

Quantité de chaleur fournie :

$$W = 4,18.10^6 \times 7,5 = 31,3\,10^6\text{ J}$$

Pour porter 1 l d'eau de 15 à 100°C il faut :

$$4\,180 \times 85 = 3,55\,10^5\text{ J}$$

Nombre de litres d'eau (ou masse en kg) :

$$m = \frac{31,3\,10^6}{3,55\,10^5} = 88\text{ kg (ou }88\text{ l)}$$

## PROBLÈMES DE REVISION

*Pour permettre l'utilisation rationnelle de ces problèmes nous avons précisé, entre crochets, le numéro du chapitre après lequel chacun d'eux peut être donné.*

1. [Chap. 2]. — Au barrage de Sarrans (Aveyron), la centrale électrique comporte trois groupes turbines-alternateurs ayant chacun une puissance utile de 32 000 kW.

La chute d'eau qui les alimente a une hauteur de 105 m et un débit de  $125 \text{ m}^3/\text{s}$ . Calculer :

- 1° L'énergie fournie en un an (365 j) par l'usine si la durée du fonctionnement est de 10 h par jour en moyenne;
- 2° La puissance développée par la chute;
- 3° Le rendement d'un groupe;
- 4° Le rendement de la turbine si celui de l'alternateur est de 93 %.

2. [Chap. 2]. — Le barrage de Roselend peut fournir à l'usine de La Bathie (Savoie) un débit d'eau de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  sous une hauteur de chute de 1 200 m. Le rendement de chacun des six groupes de l'usine est 80 %. La production annuelle totale est de 1 000 GWh. Calculer :

- 1° La puissance fournie par la chute;
- 2° La puissance utile d'un groupe;
- 3° Le nombre d'heures de fonctionnement en un an.

3. [Chap. 7]. — Pour connaître la puissance absorbée par un moteur électrique fonctionnant sous 220 V, on le branche seul pendant une durée de 5 mn. Le disque du compteur d'énergie dont la constante est 6 Wh a effectué 19 tours complets. Calculer :

- 1° La puissance absorbée par le moteur;
- 2° L'intensité du courant qu'il absorbe;
- 3° Sa puissance utile sachant que son rendement est 75 %.

4. [Chap. 7]. — Un moteur fonctionnant sous 230 V absorbe un courant de 180 A. Sa puissance utile est de 50 ch. Calculer :

- 1° La puissance absorbée par le moteur;
- 2° Son rendement;
- 3° L'énergie dissipée par le moteur en 1 h de fonctionnement. Cette énergie sera exprimée en joules, en watt-heures et en calories.

5. [Chap. 9]. — Une bouilloire électrique de 800 W fonctionne sous une différence de potentiel de 220 V. Elle permet de porter en 12 mn de  $15^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$  la température de 1 litre d'eau. Calculer :

- 1° L'intensité consommée par la bouilloire et sa résistance;

- 2° L'énergie fournie par la bouilloire à l'eau (chaleur massique  $4180 \text{ J}/^\circ\text{C.kg}$ );  
 3° L'énergie absorbée correspondante;  
 4° L'énergie perdue et le rendement.

6. [Chap. 9]. — Un moteur fonctionne sous une tension de  $120 \text{ V}$  et absorbe  
 15 A. La résistance du moteur est  $1 \Omega$  et le rendement  $80 \%$ . Calculer :

- 1° La puissance absorbée par le moteur;  
 2° La puissance utile;  
 3° Les pertes par effet joule;  
 4° Les autres pertes.

7. [Chap. 11]. — Au départ d'une ligne de  $100 \text{ m}$  de longueur la tension est de  $240 \text{ V}$ . A l'arrivée sur le lieu d'utilisation la tension n'est plus que  $220 \text{ V}$ . Le courant dans la ligne est  $50 \text{ A}$ . Sachant que la ligne est en cuivre ( $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ). Calculer :

- 1° La chute de tension en ligne;  
 2° La résistance de la ligne;  
 3° La section du fil;  
 4° La densité de courant dans chaque fil;  
 5° Les pertes joules dans la ligne.

8. [Chap. 11]. — A froid ( $20^\circ\text{C}$ ) un rhéostat consomme un courant de  $0,5 \text{ A}$  quand on lui applique une tension de  $135 \text{ V}$ . A chaud il faut lui appliquer  $160 \text{ V}$  pour qu'il consomme le même courant. Calculer :

- 1° La résistance du rhéostat à  $20^\circ\text{C}$  puis à chaud;  
 2° La température atteinte à chaud sachant que le coefficient de température est  $\alpha = 0,004$ ;  
 3° La longueur de fil bobiné sachant que sa section est  $0,1 \text{ mm}^2$  que sa résistivité à  $0^\circ\text{C}$  est  $\rho = 80 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ .

9. [Chap. 13]. — Quatre résistances sont montées comme l'indique la figure 345. La tension appliquée entre A et C est de  $30 \text{ V}$ .

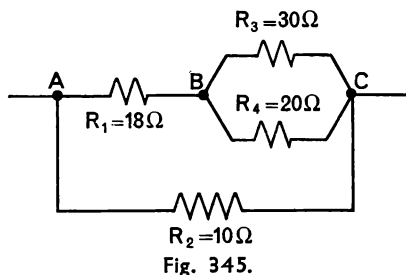


Fig. 345.

Calculer l'intensité du courant dans chaque résistance et la différence de potentiel entre B et C.

10. [Chap. 13]. — Un ampèremètre a une résistance de  $2 \Omega$  et dévie totalement pour un courant de  $0,1 \text{ A}$ . Calculer :

- 1° La valeur des shunts à placer en parallèle avec l'appareil pour obtenir les calibres suivants :  $1 \text{ A}$ ;  $3 \text{ A}$ ;  
 2° La valeur des résistances additionnelles qui permettront de transformer l'appareil en un voltmètre ayant les calibres suivants :  $15 \text{ V}$ ;  $75 \text{ V}$ ;  
 3° La résistance spécifique du voltmètre obtenu.

11. [Chap. 15]. — Un générateur de 24 V de force électromotrice et de  $0,5 \Omega$  de résistance interne alimente des résistances de  $7 \Omega$  montées en parallèle. Calculer le courant débité par le générateur et la puissance fournie aux résistances dans les cas suivants :

- 1° Il y a une résistance de  $7 \Omega$ ;
- 2° Il y a 2 résistances;
- 3° Il y a 5 résistances;
- 4° Il y a 10 résistances.

12. [Chap. 16]. — On monte en série une batterie de 60 accumulateurs ( $e = 2 \text{ V}$   $r = 0,005 \Omega$ ) et un petit générateur (survolteur) donnant une force électromotrice  $E_2 = 35 \text{ V}$  et de résistance interne  $r_2 = 0,5 \Omega$ . L'ensemble alimente une résistance  $R = 5,4 \Omega$ . Calculer :

- 1° Le courant dans le circuit;
- 2° La différence de potentiel entre les bornes :  
a) de la batterie; b) du survolteur; c) de la résistance;
- 3° La puissance totale et la puissance utile de chaque générateur (batterie et survolteur).

13. [Chap. 16]. — Un moteur fonctionne sous une tension de 130 V. Sa force contre-électromotrice est  $E' = 110 \text{ V}$  et sa résistance interne  $r' = 2 \Omega$ . Calculer :

- 1° L'intensité du courant absorbé;
- 2° Les différentes puissances (absorbée, utile, perdue) et le rendement électrique du moteur;
- 3° La force contre-électromotrice est maintenant égale à 90 V. Quelle tension faut-il appliquer pour avoir le même courant? Préciser dans quel sens (augmentation ou diminution) ont varié les grandeurs suivantes : puissance absorbée, puissance utile, rendement électrique.

14. [Chap. 17]. — Un générateur  $E = 245 \text{ V}$   $r = 0,6 \Omega$  alimente un récepteur  $E' = 210 \text{ V}$   $r' = 0,8 \Omega$  par l'intermédiaire d'une ligne bifilaire. Le courant dans le circuit est de 20 A. Calculer :

- 1° La tension entre les bornes du générateur;
- 2° La tension entre les bornes du récepteur;
- 3° La chute de tension en ligne et la résistance de celle-ci;
- 4° La puissance électrique totale du générateur et la puissance électrique utile du récepteur;
- 5° Les pertes joules dans le générateur, le récepteur et la ligne;
- 6° Vérifier.

15. [Chap. 17]. — Un générateur  $E = 15 \text{ V}$   $r = 0,4 \Omega$  alimente une résistance  $R = 2,1 \Omega$  en série avec une batterie d'accumulateurs à charger  $E' = 6 \text{ V}$   $r' = 0,5 \Omega$ . Calculer :

- 1° L'intensité du courant dans le circuit et la tension entre les bornes de chaque appareil;
- 2° Quelle résistance  $x$  faut-il placer en parallèle avec la batterie pour que le courant dans celle-ci soit nul? Quel est alors le courant dans le reste du circuit?

16. [Chap. 17]. — Deux générateurs  $E_1 = 130 \text{ V}$   $r_1 = 1 \Omega$  et  $E_2 = 120 \text{ V}$   $r_2 = 1 \Omega$  sont montés en parallèle (fig. 346). Calculer :

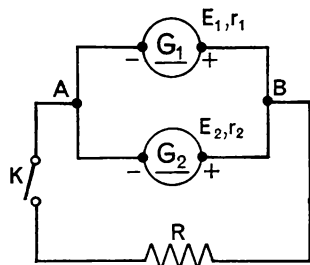


Fig. 346.

1° Le courant de circulation  $I_c$  que débite le générateur 1 dans le générateur 2 quand l'interrupteur K est ouvert;

2° On monte entre A et B une résistance R telle que la tension entre ces deux points soit  $U = 100 \text{ V}$ . Quels sont les courants  $I_1$  et  $I_2$  débités par les générateurs, le courant I dans la résistance R et la valeur de celle-ci?

3° Vérifier que

$$I_1 - I_2 = 2 I_c$$

montrer que l'on a

$$I_1 = \frac{I}{2} + I_c$$

et

$$I_2 = \frac{I}{2} - I_c$$

17. [Chap. 19]. — La force contre-électromotrice d'une cuve de fabrication d'aluminium est  $2,4 \text{ V}$ . La tension appliquée à la cuve est  $7 \text{ V}$  et le courant qui la traverse  $50\,000 \text{ A}$ . Calculer :

- 1° La résistance de la cuve et les pertes joules correspondantes;  
2° La production horaire d'aluminium;  
3° L'énergie dépensée pour la fabrication de  $1 \text{ kg}$  de ce métal.

18. [Chap. 21]. — La capacité d'une pile Leclanché est  $500 \text{ Ah}$ . Sa force électromotrice est  $1,5 \text{ V}$ , sa résistance interne  $0,1 \Omega$  et son prix d'achat  $15 \text{ F}$ .

1° La pile débite un courant moyen de  $2 \text{ A}$ . Calculer sa différence de potentiel, son rendement et sa durée de fonctionnement;

2° Quelle énergie totale et quelle énergie utile la pile peut-elle fournir?

3° Calculer le coût du kilowatt-heure utile.

19. [Chap. 24]. — Une batterie de 12 accumulateurs (de résistance négligeable) est chargée sous une tension constante de  $40 \text{ V}$ . On place en série avec la batterie une résistance R pendant toute la charge.

1° La force contre-électromotrice de début de charge est  $2 \text{ V}$ . Calculer R pour que le courant de charge soit  $40 \text{ A}$ ;

2° R étant inchangée le courant de fin de charge est  $25 \text{ A}$ . Quelle est alors la force contre-électromotrice d'un élément?

3° La charge ayant duré  $12 \text{ h}$ , calculer la quantité d'électricité fournie (on prendra, pour ce calcul la moyenne des courants).

20. [Chap. 24]. — Pendant la décharge, une batterie de 120 accumulateurs au cadmium-nickel a une force électromotrice totale de  $150 \text{ V}$  et une résistance totale de  $1,2 \Omega$ . Elle est utilisée  $2 \text{ h}$  par jour avec un débit de  $20 \text{ A}$ . La recharge



est effectuée pendant les 22 h restantes avec un courant constant de 2,5 A, la force contre-électromotrice d'un élément est alors 1,6 V. Calculer :

- 1° La différence de potentiel pendant la décharge et pendant la charge;
- 2° La quantité d'électricité et l'énergie utile fournies pendant la décharge journalière;
- 3° La quantité d'électricité et l'énergie absorbées pendant la recharge journalière;
- 4° Les rendements en quantité et en énergie.

**21** [Chap. 29]. — Une roue est formée d'un moyeu et de rayons de 20 cm de longueur. Quand l'inverseur K est en 1, un courant  $I = 40$  A arrive par le moyeu, traverse le rayon qui plonge dans du mercure et quitte le système par la cuve qui est conductrice. Le dispositif est conçu de telle façon que lorsqu'un rayon quitte le mercure un autre y arrive (fig. 347). Il y a donc en permanence un rayon soumis à une force électromagnétique et un seul. L'induction d'un champ uniforme est perpendiculaire au plan de la figure (convention du § 200, 2°, b) et a une valeur de 0,4 T.

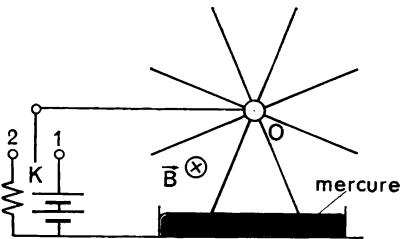


Fig. 347.

- 1° Calculer la force qui s'exerce sur un rayon, préciser son point d'application et son sens.
- 2° Quel est le moment par rapport à O de cette force?
- 3° Calculer le travail effectué par tour de rotation en utilisant le moment.
- 4° Comment pourrait-on appliquer la formule du flux coupé? Retrouver la valeur du travail avec cette formule.

**22** [Chap. 30]. — Une bobine en forme de tore a une longueur de 0,9 m. Elle comporte 600 spires, de 11 cm<sup>2</sup> de section, traversées par un courant de 0,825 A.

- 1° Calculer le champ produit sur la circonférence médiane et l'induction dans le vide correspondante.
- 2° En réalité la bobine entoure un noyau de fer de perméabilité relative  $\mu_r = 1\,600$ . Calculer l'induction dans le fer.
- 3° Une seconde bobine de 200 spires est enroulée sur le même noyau. Calculer le flux total à travers cette bobine.

**23** [Chap. 31]. — L'inverseur K de la figure 311 est placé en 2 et la roue est entraînée à la vitesse de 150 t/mn.

- 1° Calculer le flux coupé par chacun des 8 rayons quand il est en contact avec le mercure et la durée de ce contact.
- 2° Quelle est la force électromotrice moyenne induite dans un rayon pendant ce temps?
- 3° La résistance totale du circuit étant de 10  $\Omega$ . Calculer le courant moyen induit.

**24** [Chap. 32]. — Deux bobines  $b_1$  et  $b_2$  sont placées sur un anneau en fer doux de perméabilité relative constante  $\mu_r = 1\,500$ . La longueur commune aux bobines et au noyau est 0,75 m, la section commune est 12 cm<sup>2</sup>. Les nombres de spires sont respectivement  $N_1 = 800$  spires et  $N_2 = 300$  spires.

1<sup>o</sup> Calculer les inductances propres  $L_1$  et  $L_2$  compte tenu de la présence du fer.

2<sup>o</sup> Calculer l'inductance mutuelle des bobines (coefficient de couplage égal à 1).

3<sup>o</sup> Calculer le flux qui traverse  $b_2$  quand  $b_1$  est parcourue par un courant de 0,6 A.

a) En calculant le champ puis l'induction dus à  $b_1$ .

b) En appliquant la formule  $\Phi_{1/2} = M I_1$ .

4<sup>o</sup> Le courant dans  $b_1$  varie uniformément de 5 A par seconde, quelle est la f.é.m. induite dans  $b_2$ ?

**25** [Chap. 33]. — Un galvanomètre de résistance interne  $g = 250\ \Omega$  a une sensibilité de  $10^{-7}$  A/mm. Son cadran comporte 100 divisions.

1<sup>o</sup> Calculer la résistance additionnelle qui transformera ce galvanomètre en un voltmètre de calibre 30 V. Quelle est la résistance spécifique du voltmètre obtenu?

2<sup>o</sup> Calculer le shunt à placer entre les bornes du galvanomètre pour le transformer en un ampèremètre de calibre 1 mA. Quelle est la chute de tension produite par cet ampèremètre?

**26** [Chap. 33]. — On effectue la mesure d'une résistance  $R$  par la méthode volt-ampèremétrique (cf. fig. 53 et 54, p. 78).

Le voltmètre a 150 divisions et est utilisé sur le calibre 75 V. L'ampèremètre a 100 divisions et est utilisé sur le calibre 0,5 A, on connaît en outre sa résistance  $a = 30\ \Omega$ .

On a relevé les mesures suivantes :

Montage 1 :  $V_m$  : 142 divisions     $A_m$  : 54,2 divisions

Montage 2 :  $V_m$  : 123,2 divisions     $A_m$  : 32 divisions

1<sup>o</sup> Calculer les valeurs de  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ .

2<sup>o</sup> Calculer la valeur de  $R$  et celle de la résistance  $v$  du voltmètre.

**27** [Chap. 33]. — Deux fils d'une ligne de transport d'énergie sont distants de 10 cm et parcourus par le même courant  $I = 200$  A.

1<sup>o</sup> Calculer l'induction produite par un fil à une distance de 5 cm. Quelle est l'induction totale au milieu des 2 fils?

2<sup>o</sup> Pour mesurer cette induction on utilise un galvanomètre balistique de  $1\,000\ \Omega$  de résistance dont la constante est  $K = 10^{-9}$  C/mm. Le galvanomètre dévie de 32 divisions. Calculer la section de chacune des 100 spires de la bobine exploratrice.

**28** [Chap. 36]. — On veut fabriquer un condensateur au mica de 10 nF ayant une tension de claquage de 5 000 V (cf. fig. 304).

Calculer :

1° L'épaisseur du mica et la surface des armatures.

2° La quantité d'électricité et l'énergie maximales que peut emmagasiner le condensateur si l'on prend un coefficient de sécurité égal à 2 pour éviter le claquage.

**29** [Chap. 36]. — On possède 20 condensateurs de  $4,7 \mu\text{F}$  et 35 de  $2,2 \mu\text{F}$ .

1° Quelle capacité obtient-on en les montant tous en parallèle?

2° On leur applique une tension de 350 V, calculer la quantité d'électricité et l'énergie emmagasinée.

3° Quelle devrait être la surface d'un condensateur à air de 1 mm d'épaisseur pour former la même capacité?

---

## RÉPERTOIRE DES PRINCIPAUX NOMS PROPRES CITÉS

---

- AMPÈRE André-Marie** (1775-1836), Français, a établi les lois de l'électrodynamique.
- ARRHENIUS Svante-Auguste** (1859-1927), Suédois, a énoncé la théorie des ions.
- COTTON Aimé** (1869-1951), Français, a inventé la balance électromagnétique qui porte son nom.
- COULOMB Charles-Auguste** (1736-1806), Français, a établi les lois qui portent son nom en magnétisme et en électrostatique.
- EDISON Thomas** (1847-1931), Américain (U.S.A.), a inventé la lampe à incandescence, le phonographe, l'accumulateur alcalin.
- FARADAY Michaël** (1791-1867), Anglais, a établi des lois en électrochimie et en électromagnétisme.
- FOUCAULT Jean** (1819-1868), Français, a mesuré la vitesse de la lumière.
- GAUSS Karl Friedrich** (1777-1855), Allemand, a effectué de nombreux travaux en mathématiques et en physique.
- GIORGI Giovanni** (1871-1950), Italien, a jeté dès 1901 les bases du système international d'unités (S.I.), rendu légal en France en mai 1961
- HENRY Joseph** (1797-1878), Américain, a découvert la self-induction, la bobine d'induction, les mouvements électriques oscillatoires.
- JOULE James-Prescott** (1818-1889), Anglais, a effectué des travaux sur la chaleur (mesure de l'équivalent mécanique de la calorie ( $1 \text{ calorie} = 4,18 \text{ J}$ )).
- LAPLACE Pierre** (1749-1827), Français, a établi les lois de l'électromagnétisme.
- LECLANCHÉ Georges** (1839-1882), Français, fabriqua la pile à dépolarisant solide.
- LENZ Heinrich** (1804-1865), Russe, a énoncé la loi donnant le sens du courant induit.
- MAXWELL James** (1831-1879), Écossais, auteur de la théorie électromagnétique de la lumière.
- NEWTON Isaac** (1642-1727), Anglais, a énoncé les lois de la gravitation.
- OERSTED Christian** (1777-1851), Danois, a découvert l'électromagnétisme.

---

**OHM Georges-Simon** (1787-1854), Allemand, a établi les lois des circuits électriques.

**PLANTÉ Gaston** (1834-1889), Français, a fabriqué le premier accumulateur.

**TESLA Nicolas** (1856-1943), Yougoslave, a effectué des travaux en électricité et en radio.

**VOLTA Alexandre** (1745-1827), Italien, a fabriqué la première pile électrique.

**WATT James** (1736-1819), Écossais, a effectué des travaux sur la machine à vapeur et inventa le régulateur à boules qui porte son nom.

**WEBER Wilhelm** (1804-1891), Allemand, a étudié la magnétisme terrestre et l'induction.

---



MASSON ET C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS  
120, bd Saint-Germain, Paris (VI<sup>e</sup>)  
Dépôt légal n° 6.068: 1<sup>er</sup> trim. 1969

Imprimé  
en  
France  
[III]

FD - Imprimerie Alençonnaise  
Rue Édouard-Belin, 61-Alençon  
Dépôt légal n° 8.521: 1<sup>er</sup> trim. 1969